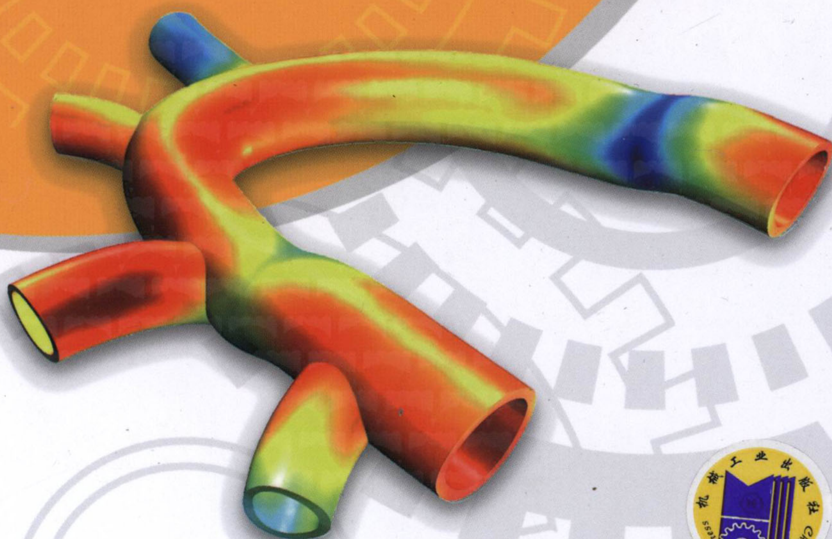
CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例

CAE应用联盟 组编







关注“机械工业出版社计算机分社”官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

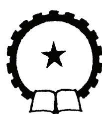
VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例

CAE 应用联盟　组编



机 械 工 业 出 版 社

本书以 ANSYS Workbench 16.0 为对象，详细介绍了该软件的功能及应用。本书内容丰富，涉及领域范围广，读者在学习软件操作的同时，也能掌握解决相关工程领域实际问题的思路与方法，并能自如地解决本领域所出现的问题。

全书共分 6 篇，第 1 篇从有限元理论着手介绍了有限元的控制方程以及 ANSYS Workbench 平台的基础应用知识；第 2 篇通过项目范例讲解在 Workbench 平台中进行结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析、瞬态动力学分析及线性屈曲分析的方法；第 3 篇为结构有限元分析的进阶部分，讲解在 Workbench 平台中进行的显式动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及压电分析的方法；第 4 篇通过项目范例讲解在 Workbench 平台中进行的热力学分析、流体力学分析及电磁场分析的方法；第 5 篇作讲解在 Workbench 平台的结构优化分析；第 6 篇通过案例介绍 ANSYS AIM 分析环境的分析过程与方法。

本书工程实例丰富、讲解详尽，内容安排循序渐进、深入浅出，适合不同基础的读者。本书适合理工院校土木工程、机械工程、力学、电气工程等相关专业的高年级本科生、研究生及教师使用，同时也可以作为相关工程技术人员从事工程研究的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例 / CAE 应用联盟组编.
—北京：机械工业出版社，2016.5
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-54571-2

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①C… Ⅲ. ①有限元分析-应用软件 Ⅳ. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 192858 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦 责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞 责任印制：李 飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 9 月第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 29.75 印张 • 733 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-54571-2
定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：（010）88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：（010）68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
（010）88379203	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

出 版 说 明



随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

ANSYS Workbench 16.0 具有强大的结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析的功能，除此之外，从 ANSYS 16.0 版本开始，在 Workbench 平台中对分析界面进行了统一改进——ANSYS AIM 分析环境。

作为业界有一定影响力的工程仿真技术集成平台，Workbench 16.0 提供了全新的“项目视图（Project Schematic View）”功能，将整个仿真流程更加紧密地组合在一起，通过简单的拖拽操作即可完成复杂的多物理场分析流程及多物理场的优化分析功能。

1．本书特点

由浅入深，循序渐进：本书以初、中级读者为对象，首先从有限元基本原理及 ANSYS Workbench 使用基础讲起，再辅以 ANSYS Workbench 在工程中的应用案例帮助读者尽快掌握使用 ANSYS Workbench 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、内容新颖：本书将作者多年 ANSYS Workbench 使用经验与实际工程应用案例结合，在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

实例典型、轻松易学：学习分析案例的具体操作是掌握 ANSYS Workbench 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ANSYS Workbench 在各方面的应用。

2．本书内容

本书在必要的理论概述的基础上，通过大量的典型案例对 ANSYS Workbench 分析平台中的模块进行了详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解，全书内容简洁、明快，给人耳目一新的感觉。

本书主要分 6 篇 20 章，主要介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台在结构、电磁、热学、噪声、流体力学、压电材料、复合材料及疲劳分析等各个领域中的有限元分析及操作过程：

第 1 篇介绍了有限元理论和 ANSYS Workbench 16.0 平台常用命令，几何建模与导入方法，网格划分及网格质量评价方法，结果的后处理操作等方面的内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 1 章：有限元基本理论　　第 2 章：几何建模
第 3 章：网格划分　　第 4 章：后处理

第 2 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台结构基础分析内容，包括结构静力学分析、模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动分析、瞬态动力学分析及线性屈曲分析等 7 个方面的内容，本篇包括以下 7 个章节的内容。

第 5 章：结构静力学分析　　第 6 章：模态分析
第 7 章：谐响应分析　　第 8 章：响应谱分析
第 9 章：随机振动分析　　第 10 章：瞬态动力学分析
第 11 章：线性屈曲分析分析

第 3 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台的进阶分析功能，主要包括显式动力学分析、复合材料分析、疲劳分析及压电分析等内容，本篇包括以下 4 个章节的内容。

第 12 章：显式动力学分析　　第 13 章：复合材料分析

第 14 章：疲劳分析　　　　　　　　第 15 章：压电分析

第 4 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台在电磁场、热力学及流体力学方面的内容，本篇包括以下 3 个章节的内容。

第 16 章：热学分析　　　　　　　　第 17 章：流体动力学分析

第 18 章：电磁场分析

第 5 篇介绍了 ANSYS Workbench 16.0 平台结构高级分析功能，主要介绍了结构优化方面的内容，本篇包括以下 1 章的内容。

第 19 章：结构优化分析

第 6 篇介绍了使用 ANSYS AIM 分析环境进行有限元分析的一般方法及步骤，本篇包括以下 1 章的内容：

第 20 章：ANSYS AIM 分析过程

3．网盘内容

本书附赠网盘资料主要包括案例模型与案例的操作文档，其中案例的模型文件与案例工程文件同放于相关章节的目录中，以方便读者查询。

例如：第 5 章的第 2 个操作实例“静力分析实例 2——子模型静力分析”的几何文件和工程项目管理文件放置在“网盘\Chapter05\char05-2\”路径的文件夹下。

4．读者对象

本书适合于 ANSYS Workbench 16.0 初学者和期望提高有限元分析及建模仿真工程应用能力的读者，具体说明如下。

★相关从业人员　　　　　　　　★初学 ANSYS Workbench 16.0 的技术人员

★大中专院校的教师和在校生　　★相关培训机构的教师和学员

★参加工作实习的“菜鸟”　　　★ ANSYS Workbench 16.0 爱好者

★广大科研工作人员　　　　　　★初、中级 ANSYS Workbench 16.0 从业人员

注：其中电磁分析模块（Maxwell）及疲劳分析模块（nCode）需要读者单独安装，另外本书中部分章节的内容需要安装接口程序。

建议使用 ANSYS Workbench 16.0 及以上平台学习本教程。

5．读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者朋友在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，编者会尽快给予解答，我们将竭诚为您服务。

6．本书作者

本书由 CAE 应用联盟组编，参与编写的有丁金滨、张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、张岩、唐家鹏、石良臣、王菁、郭海霞、李昕、刘成柱、沈再阳、林金宝、高飞、宋玉旺、张文电、张亮亮、于苍海和孙国强，在此一并表示感谢。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编　者

目　　录

出版说明
前言

第 1 篇

第 1 章　有限元基本理论 ………… 1
1.1　有限元法发展综述 ………… 1
1.1.1　有限元法的孕育过程及诞生和发展 ………… 2
1.1.2　有限元法的基本思想 ………… 2
1.1.3　有限元的应用及其发展趋势 ………… 4
1.2　有限元分析基本理论 ………… 6
1.2.1　有限元分析的基本概念和计算步骤 ………… 6
1.2.2　基于最小势能原理的有限元法 ………… 13
1.2.3　杆系结构的非线性分析理论 ………… 17
1.2.4　稳定计算理论 ………… 25
1.3　工程问题中的有限元理论 ………… 28
1.3.1　工程问题的数学物理方程 ………… 28
1.3.2　变分函数 ………… 31
1.3.3　插值函数 ………… 32
1.3.4　形函数 ………… 32
1.3.5　刚度矩阵 ………… 32
1.3.6　连通性 ………… 33
1.3.7　边界条件 ………… 33
1.3.8　圆柱坐标系中的问题 ………… 34
1.3.9　直接方法 ………… 34
1.4　桁架与梁的有限元方法 ………… 35
1.4.1　桁架的定义 ………… 35
1.4.2　桁架的有限元公式 ………… 36
1.4.3　梁的定义 ………… 40
1.4.4　梁的有限元公式 ………… 41
1.4.5　载荷矩阵 ………… 43
1.5　板的有限元方法 ………… 44
1.5.1　矩形单元 ………… 44
1.5.2　自然坐标 ………… 46
1.5.3　线性三角形单元 ………… 47
1.6　应用实例 ………… 47
1.6.1　实例 1：求解悬索的位移 ………… 47
1.6.2　实例 2：求温度分布问题 ………… 49
1.7　本章小结 ………… 50
第 2 章　几何建模 ………… 51
2.1　ANSYS 16.0 平台及模块 ………… 51
2.1.1　Workbench 平台界面 ………… 52
2.1.2　菜单栏 ………… 52
2.1.3　工具栏 ………… 65
2.1.4　工具箱 ………… 65
2.2　DesignModeler 16.0 几何建模 ………… 69
2.2.1　DesignModeler 几何建模平台 ………… 69
2.2.2　菜单栏 ………… 70
2.2.3　工具栏 ………… 80
2.2.4　常用命令栏 ………… 81
2.2.5　Tree Outline（模型树） ………… 81
2.2.6　DesignModeler 几何建模实例——连接板 ………… 84
2.2.7　ANSYS SpaceClaim 同步几何建模实例——连接板 ………… 89
2.3　本章小结 ………… 93
第 3 章　网格划分 ………… 94
3.1　ANSYS Meshing 16.0 网格划分 ………… 94
3.1.1　Meshing 网格划分适用领域 ………… 94
3.1.2　Meshing 网格划分方法 ………… 95
3.1.3　Meshing 网格默认设置 ………… 97
3.1.4　Meshing 网格尺寸设置 ………… 98
3.1.5　Meshing 网格膨胀层设置 ………… 101
3.1.6　Meshing 网格 Patch Conforming 选项 ………… 103

3.1.7 Meshing 网格高级选项 ······ 103
3.1.8 Meshing 网格损伤设置 ······ 104
3.1.9 Meshing 网格评估统计 ······ 104
3.2 ANSYS Meshing 16.0 网格划分实例 ······ 110
3.2.1 应用实例 1——网格尺寸控制 ······ 110
3.2.2 应用实例 2——扫掠网格划分 ······ 117
3.2.3 应用实例 3——多区域网格划分 ······ 121
3.2.4 应用实例 4——CDB 网格导入 ······ 125
3.3 小结 ······ 130
第 4 章 后处理 ······ 131
4.1 ANSYS Workbench 16.0 后处理 ······ 131
4.1.1 查看结果 ······ 131
4.1.2 结果显示 ······ 134
4.1.3 变形显示 ······ 135
4.1.4 应力和应变 ······ 135
4.1.5 接触结果 ······ 136
4.1.6 自定义结果显示 ······ 137
4.2 案例分析 ······ 138
4.2.1 问题描述 ······ 138
4.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 138
4.2.3 导入创建几何体 ······ 139
4.2.4 添加材料库 ······ 140
4.2.5 添加模型材料属性 ······ 141
4.2.6 划分网格 ······ 142
4.2.7 施加载荷与约束 ······ 143
4.2.8 结果后处理 ······ 144
4.2.9 保存与退出 ······ 148
4.3 本章小结 ······ 148

第 2 篇

第 5 章 结构静力学分析 ······ 149
5.1 静力分析简介 ······ 149
5.1.1 线性静力分析 ······ 149
5.1.2 线性静力分析流程 ······ 150
5.1.3 线性静力分析基础 ······ 150
5.2 静力分析实例 1——实体静力分析 ······ 151
5.2.1 问题描述 ······ 151
5.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 151
5.2.3 导入创建几何体 ······ 152
5.2.4 添加材料库 ······ 153
5.2.5 添加模型材料属性 ······ 154
5.2.6 划分网格 ······ 155
5.2.7 施加载荷与约束 ······ 155
5.2.8 结果后处理 ······ 157
5.2.9 保存与退出 ······ 159
5.3 静力分析实例 2——子模型静力分析 ······ 159
5.3.1 问题描述 ······ 159
5.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ······ 159
5.3.3 导入创建几何体 ······ 160
5.3.4 添加材料库 ······ 161
5.3.5 添加模型材料属性 ······ 163
5.3.6 划分网格 ······ 164
5.3.7 施加载荷与约束 ······ 164
5.3.8 结果后处理 ······ 166
5.3.9 子模型分析 ······ 167
5.3.10 保存并退出 ······ 171
5.4 本章小结 ······ 171
第 6 章 模态分析 ······ 172
6.1 结构动力学分析简介 ······ 172
6.1.1 结构动力学分析 ······ 172
6.1.2 结构动力学分析的阻尼 ······ 173
6.2 模态分析简介 ······ 173
6.2.1 模态分析 ······ 173
6.2.2 模态分析基础 ······ 174

6.2.3 预应力模态分析 ………………………… 175
6.3 模态分析实例 1——模态分析 ………………………… 175
6.3.1 问题描述 ………………………… 175
6.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ………………………… 175
6.3.3 创建几何体 ………………………… 176
6.3.4 添加材料库 ………………………… 176
6.3.5 添加模型材料属性 ………………………… 178
6.3.6 划分网格 ………………………… 178
6.3.7 施加载荷与约束 ………………………… 179
6.3.8 结果后处理 ………………………… 180
6.3.9 保存与退出 ………………………… 183
6.4 模态分析实例 2——有预应力模态分析 ………………………… 183
6.4.1 问题描述 ………………………… 183
6.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ………………………… 184
6.4.3 创建几何体 ………………………… 184
6.4.4 添加材料库 ………………………… 185
6.4.5 添加模型材料属性 ………………………… 186
6.4.6 划分网格 ………………………… 187
6.4.7 施加载荷与约束 ………………………… 187
6.4.8 模态分析 ………………………… 189
6.4.9 后处理 ………………………… 189
6.4.10 保存与退出 ………………………… 191
6.5 本章小结 ………………………… 191
第 7 章 谐响应分析 ………………………… 192
7.1 谐响应分析基础 ………………………… 192
7.1.1 谐响应分析简介 ………………………… 192
7.1.2 谐响应分析的载荷与输出 ………………………… 193
7.1.3 谐响应分析通用方程 ………………………… 193
7.2 谐响应分析实例 1——梁单元谐响应分析 ………………………… 193
7.2.1 问题描述 ………………………… 193
7.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ………………………… 194
7.2.3 创建模态分析项目 ………………………… 195
7.2.4 材料选择 ………………………… 195
7.2.5 施加载荷与约束 ………………………… 195
7.2.6 模态求解 ………………………… 197
7.2.7 后处理 ………………………… 198
7.2.8 创建谐响应分析项目 ………………………… 200
7.2.9 施加载荷与约束 ………………………… 200
7.2.10 谐响应计算 ………………………… 202
7.2.11 结果后处理 ………………………… 202
7.2.12 保存与退出 ………………………… 204
7.3 谐响应分析实例 2——谐响应分析 ………………………… 204
7.3.1 问题描述 ………………………… 204
7.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ………………………… 205
7.3.3 材料选择 ………………………… 206
7.3.4 施加载荷与约束 ………………………… 206
7.3.5 模态求解 ………………………… 208
7.3.6 后处理 ………………………… 208
7.3.7 谐响应分析 ………………………… 210
7.3.8 谐响应计算 ………………………… 211
7.3.9 结果后处理 ………………………… 211
7.3.10 保存与退出 ………………………… 213
7.4 谐响应分析实例 3——含阻尼谐响应分析 ………………………… 214
7.5 本章小结 ………………………… 215
第 8 章 响应谱分析 ………………………… 216
8.1 响应谱分析简介 ………………………… 216
8.1.1 频谱的定义 ………………………… 216
8.1.2 响应谱分析的基本概念 ………………………… 217
8.2 响应谱分析实例——简单梁响应谱分析 ………………………… 219
8.2.1 问题描述 ………………………… 219
8.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 ………………………… 220
8.2.3 导入几何体模型 ………………………… 220
8.2.4 静态力学分析 ………………………… 221
8.2.5 添加材料库 ………………………… 221
8.2.6 网格划分 ………………………… 222
8.2.7 施加约束 ………………………… 222
8.2.8 模态分析 ………………………… 224

8.2.9　结果后处理 224
8.2.10　响应谱分析 226
8.2.11　添加加速度谱 226
8.2.12　后处理 227
8.2.13　其他设置 229
8.2.14　保存与退出 230
8.3　本章小结 230
第 9 章　随机振动分析 231
9.1　随机振动分析简介 231
9.2　随机振动分析实例——简单梁随机振动分析 232
9.2.1　问题描述 232
9.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目 233
9.2.3　导入几何体模型 233
9.2.4　静态力学分析 234
9.2.5　添加材料库 235
9.2.6　网格划分 235
9.2.7　施加约束 236
9.2.8　模态分析 238
9.2.9　结果后处理 238
9.2.10　随机振动分析 239
9.2.11　添加加速度谱 239
9.2.12　后处理 240
9.2.13　保存与退出 242
9.3　本章小结 242
第 10 章　瞬态动力学分析 243
10.1　瞬态动力学分析简介 243
10.1.1　瞬态动力学分析简介 243
10.1.2　瞬态动力学分析基本公式 243
10.2　瞬态动力学分析实例 1——建筑物地震分析 244
10.2.1　问题描述 244
10.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目 245
10.2.3　创建几何体模型 245
10.2.4　瞬态动力学分析 246
10.2.5　添加材料库 246
10.2.6　划分网格 246
10.2.7　施加约束 247
10.2.8　结果后处理 250
10.2.9　保存与退出 253
10.3　瞬态动力学分析实例 2——振动分析 253
10.3.1　问题描述 253
10.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目 253
10.3.3　创建几何体模型 253
10.3.4　模态分析 254
10.3.5　模态分析前处理 255
10.3.6　施加约束 256
10.3.7　结果后处理 257
10.3.8　瞬态动力学分析 258
10.3.9　添加动态力载荷 259
10.3.10　后处理 262
10.3.11　保存与退出 264
10.4　本章小结 264
第 11 章　线性屈曲分析 265
11.1　线性屈曲分析简介 265
11.1.1　屈曲分析 265
11.1.2　线性屈曲分析 265
11.2　项目案例 1——钢管屈曲分析 266
11.2.1　问题描述 266
11.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目 266
11.2.3　创建几何体 266
11.2.4　设置材料 268
11.2.5　添加模型材料属性 268
11.2.6　划分网格 269
11.2.7　施加载荷与约束 270
11.2.8　结果后处理 272
11.2.9　线性屈曲分析 274
11.2.10　施加载荷与约束 274
11.2.11　结果后处理 275
11.2.12　保存与退出 277
11.3　本章小结 277



第 3 篇

第 12 章　显式动力学分析 278
12.1　显式动力学分析简介 278
12.2　显式动力学分析实例——钢球撞击金属网分析 279
12.2.1　问题描述 280
12.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目 280
12.2.3　启动 Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)建立项目 281
12.2.4　材料选择与赋予 281
12.2.5　建立项目分析 282
12.2.6　分析前处理 283
12.2.7　施加载荷 283
12.2.8　启动 LS-DYNA 程序 286
12.2.9　Autodyn 计算 287
12.2.10　问题解读 289
12.3　显式动力学分析实例——金属块穿透钢板分析 290
12.3.1　问题描述 290
12.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目 290
12.3.3　绘制几何模型 290
12.3.4　添加材料方法 291
12.3.5　添加材料 293
12.3.6　显式动力学分析前处理 294
12.3.7　施加约束 295
12.3.8　结果后处理 297
12.3.9　启动 AUTODYN 软件 298
12.3.10　LS-DYNA 计算 300
12.3.11　保存与退出 301
12.4　本章小结 301
第 13 章　复合材料分析 302
13.1　复合材料概论 302
13.2　层合板的失效判断准则 303
13.3　复合材料层合板强度的有限单元法 306
13.4　ANSYS ACP 模块功能概述 307
13.5　复合材料静力学分析实例——复合板受力分析 310
13.5.1　问题描述 310
13.5.2　启动 Workbench 软件 310
13.5.3　静力分析项目 311
13.5.4　定义复合材料数据 312
13.5.5　数据更新 314
13.5.6　ACP 复合材料定义 315
13.5.7　有限元计算 322
13.5.8　后处理 323
13.5.9　ACP 专业后处理工具 324
13.5.10　保存与退出 326
13.6　本章小结 326
第 14 章　疲劳分析 327
14.1　疲劳分析简介 327
14.2　疲劳分析方法 329
14.2.1　疲劳程序 329
14.2.2　应力寿命曲线 330
14.2.3　疲劳材料特性 330
14.3　疲劳分析实例 1——前桥疲劳分析 331
14.3.1　问题描述 331
14.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目 332
14.3.3　导入创建几何体 332
14.3.4　添加材料库 333
14.3.5　添加模型材料属性 334
14.3.6　划分网格 335
14.3.7　施加载荷与约束 336
14.3.8　结果后处理 338
14.3.9　保存工程文件 340
14.3.10　添加疲劳分析选项 340
14.3.11　保存与退出 342
14.4　疲劳分析实例 2——实体疲劳分析 343
14.4.1　问题描述 344
14.4.2　启动 Workbench 并建立分析

项目……344
14.4.3　导入创建几何体……344
14.4.4　添加材料库……345
14.4.5　添加模型材料属性……345
14.4.6　划分网格……345
14.4.7　施加载荷与约束……346
14.4.8　结果后处理……347
14.4.9　保存文件……348
14.4.10　启动 nCode 程序……348
14.4.11　疲劳分析……350
14.4.12　保存与退出……352
14.5　本章小结……352
第 15 章　压电分析……353
15.1　压电材料基本知识……353
15.1.1　压电材料的概念……353
15.1.2　压电材料的主要特性……354
15.1.3　压电复合材料的有限元分析方法……354
15.1.4　基本耦合公式……354
15.1.5　压电材料的主要参数……355
15.2　压电分析模块的安装……356
15.3　压电分析实例——压电传感器分析……358
15.3.1　问题描述……358
15.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目……359
15.3.3　导入创建几何体……359
15.3.4　添加材料库……362
15.3.5　网格与属性……362
15.3.6　施加载荷与约束……363
15.3.7　结果后处理……364
15.3.8　模态分析……365
15.3.9　保存与退出……368
15.4　小结……368

第 4 篇

第 16 章　热学分析……369
16.1　热力学分析简介……369
16.1.1　热力学分析目的……369
16.1.2　热力学分析……369
16.1.3　基本传热方式……370
16.2　稳态热学分析实例 1——热传递分析……370
16.2.1　问题描述……371
16.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目……371
16.2.3　导入几何体模型……371
16.2.4　创建分析项目……372
16.2.5　添加材料库……372
16.2.6　添加模型材料属性……373
16.2.7　划分网格……374
16.2.8　施加载荷与约束……374
16.2.9　结果后处理……376
16.2.10　保存与退出……377
16.3　稳态热学分析实例 2——热对流分析……378
16.3.1　问题描述……378
16.3.2　启动 Workbench 并建立分析项目……378
16.3.3　导入几何体模型……378
16.3.4　创建分析项目……379
16.3.5　添加材料库……380
16.3.6　添加模型材料属性……381
16.3.7　划分网格……382
16.3.8　施加载荷与约束……382
16.3.9　结果后处理……383
16.3.10　保存与退出……385
16.3.11　读者演练……385
16.4　稳态热学分析实例 3——热辐射分析……385
16.4.1　案例介绍……385
16.4.2　启动 Workbench 并建立分析项目……385
16.4.3　定义材料参数……386
16.4.4　导入模型……386
16.4.5　划分网格……386

16.4.6 定义荷载 …… 388
16.4.7 求解以后处理 …… 389
16.4.8 保存并退出 …… 390
16.5 本章小结 …… 390
第 17 章 流体动力学分析 …… 391
17.1 流体动力学分析简介 …… 391
17.1.1 流体动力学分析 …… 391
17.1.2 CFD 基础 …… 394
17.2 流体动力学实例——CFX 旋转机械流场分析 …… 401
17.2.1 问题描述 …… 401
17.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 …… 402
17.2.3 BladeGen 中设置 …… 402
17.2.4 TurboGrid 中设置 …… 405
17.2.5 CFX 中设置 …… 408
17.3 本章小结 …… 418
第 18 章 电磁场分析 …… 419
18.1 电磁场基本理论 …… 419
18.1.1 麦克斯韦方程 …… 419
18.1.2 一般形式的电磁场微分方程 …… 420
18.1.3 电磁场中常见边界条件 …… 421
18.1.4 ANSYS Workbench 平台电磁分析 …… 421
18.1.5 Ansoft 软件电磁分析 …… 422
18.2 瞬态磁场分析实例——金属屏蔽分析 …… 423
18.2.1 启动 Workbench 并建立分析项目 …… 423
18.2.2 建立求解器 …… 424
18.2.3 建立几何模型 …… 424
18.2.4 添加材料 …… 426
18.2.5 边界条件设定 …… 427
18.2.6 网格划分 …… 429
18.2.7 求解计算 …… 430
18.2.8 图表显示 …… 432
18.2.9 3D 图表显示 …… 433
18.2.10 修改材料属性 …… 434
18.2.11 保存与退出 …… 436
18.3 本章小结 …… 436

第 5 篇

第 19 章 结构优化分析 …… 437
19.1 优化分析简介 …… 437
19.1.1 优化设计概述 …… 437
19.1.2 Workbench 结构优化分析 …… 438
19.2 优化分析实例——响应曲面优化分析 …… 438
19.2.1 问题描述 …… 438
19.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 …… 439
19.2.3 导入几何模型 …… 439
19.2.4 结果后处理 …… 445
19.3 本章小结 …… 452

第 6 篇

第 20 章 ANSYS AIM 分析过程 …… 453
20.1 ANSYS AIM 分析环境简介 …… 453
20.2 ANSYS AIM 分析实例——板件弯曲分析 …… 454
20.2.1 问题描述 …… 454
20.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目 …… 454
20.3 本章小结 …… 461
参考文献 …… 462

第1篇

第1章 有限元基本理论

有限元是求解数理方程的一种数值计算方法，是将弹性理论、数学和计算机软件有机结合在一起的一种数值分析技术，是解决工程实际问题的一种有力工具。

目前，有限单元法在许多科学技术领域和实际工程中得到了广泛的应用，如机械制造、材料科学、航空航海、土木工程、电气工程、国防军工、石油化工及汽车能源等。

现有的商业化软件已经成功应用于固体力学、流体力学、传热学、电磁学、声学及生物学等领域，能够求解弹塑性问题和各种场分布问题，如水流管道的流动分析、压力分析以及多物理场的相互作用分析等。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
有限元发展历程	√			
有限元的一般求解原理		√		
有限元的一般求解方法		√		
能够对简单的单元进行有限元计算			√	√

1.1 有限元法发展综述

随着科学技术的发展，人们正在不断研发更快的交通工具、建造更大规模的建筑物和更大跨度的桥梁、制造更大功率的发电机组和更加精密的机械设备。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出产品和工程的技术性能，这就需要对结构的静、动力强度以及温度场、流场、电磁场和渗流等技术参数进行分析计算。

例如，分析计算高层建筑和大跨度桥梁在地震时所受到的影响，看看是否会发生破坏性事故；分析计算核反应堆的温度场，确定传热和冷却系统是否合理；分析涡轮机叶片内的流体动力学参数，以提高其运转效率。这些都可归结为求解物理问题的控制偏微分方程式往往是不可能的。

近年来在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析（Finite Element Analysis，FEA）方法（以下简称有限元法）则为解决这些复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。

有限元法是一种高效能、常用的计算方法。有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的，所以它广泛地应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中（这类场与泛

函的极值问题有着紧密的联系）。

自 1969 年以来，某些学者在流体力学中应用加权余数法中的伽辽金法（Galerkin）或最小二乘法等同样获得了有限元方程，因而有限元法可应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中，而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

1.1.1 有限元法的孕育过程及诞生和发展

300 多年前，牛顿和莱布尼茨发明了积分法，证明了该运算具有整体对局部的可加性。虽然，积分运算与有限元技术对定义域的划分是不同的（前者进行无限划分而后者进行有限划分），但积分运算为实现有限元技术准备好了一个理论基础。

在牛顿之后约 100 年，著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的解法。这两项成果的前者被用来将微分方程改写为积分表达式，后者被用来求解有限元法所得出的代数方程组。在 18 世纪，另一位数学家拉格朗日提出泛函分析。泛函分析是将偏微分方程改写为积分表达式的另一途经。

在 19 世纪末及 20 世纪初，数学家瑞雷和里兹首先提出可对全定义域运用展开函数来表达其上的未知函数。1915 年，数学家伽辽金提出了选择展开函数中形函数的伽辽金法，该方法被广泛地用于有限元法。1943 年，数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数，这实际上就是有限元的做法。到这时为止，实现有限元技术的第二个理论基础也已确立。

20 世纪 50 年代，飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组，首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析，经过一番波折后获得前述的两个离散的成功。

20 世纪 50 年代，大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作，这为实现有限元技术准备好了物质条件。1960 年前后，美国的 R.W.Clough 教授及我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后，这样的叫法被大家接受，有限元技术从此正式诞生。

1990 年 10 月，美国波音公司开始在计算机上对新型客机 B-777 进行“无纸设计”，仅用了三年半时间，于 1994 年 4 月第一架 B-777 就试飞成功，这是制造技术史上划时代的成就，其中在结构设计和评判中就大量采用了有限元分析这一手段。

1.1.2 有限元法的基本思想

有限元方法与其他求解边值问题近似方法的根本区别在于它的近似性仅限于相对小的子域中。20 世纪 60 年代初首次提出结构力学计算有限元概念的克拉夫（Clough）教授形象地将其描绘为：“有限元法=瑞利-里茨（Rayleigh Ritz）法+分片函数”，即有限元法是 Rayleigh Ritz 法的一种局部化情况。

不同于求解（往往是困难的）满足整个定义域边界条件的允许函数的 Rayleigh Ritz 法，有限元法将函数定义在简单几何形状（如二维问题中的三角形或任意四边形）的单元域上（分片函数），且不考虑整个定义域的复杂边界条件，这是有限元法优于其他近似方法的原因之一。

有限元方法（FEM）的基础是变分原理和加权余量法，其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内，选择一些合适的节点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法，将微分方程离散求解。

采用不同的权函数和插值函数形式，便构成不同的有限元方法。有限元方法最早应用于结构力学，后来随着计算机的发展慢慢用于流体力学的数值模拟。

在有限元方法中，把计算域离散剖分为有限个互不重叠且相互连接的单元，在每个单元内选择基函数，用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解，整个计算域上总体的基函数可以看为由每个单元基函数组成，整个计算域内的解可以看成是由所有单元上的近似解构成的。在河道数值模拟中，常见的有限元计算方法是由变分法和加权余量法发展而来的里兹法和伽辽金法、最小二乘法等。

根据所采用的权函数和插值函数的不同，有限元方法也分为多种计算格式。从权函数的选择来说，有配置法、矩量法、最小二乘法和伽辽金法；从计算单元网格的形状来划分，有三角形网格、四边形网格和多边形网格；从插值函数的精度来划分，又分为线性插值函数和高次插值函数等不同的组合。

同样构成不同的有限元计算格式。对于权函数，伽辽金（Galerkin）法是将权函数取为逼近函数中的基函数；最小二乘法是令权函数等于余量本身，而内积的极小值则为对待求系数的平方误差最小；在配置法中，先在计算域内选取 N 个配置点。令近似解在选定的 N 个配置点上严格满足微分方程，即在配置点上令方程余量为 0。

插值函数一般由不同次幂的多项式组成，但也有采用三角函数或指数函数组成的乘积表示，但最常用的是多项式插值函数。有限元插值函数分为两大类，一类只要求插值多项式本身在插值点取已知值，称为拉格朗日（Lagrange）多项式插值；另一种不仅要求插值多项式本身，还要求它的导数值在插值点取已知值，称为哈密特（Hermite）多项式插值。

单元坐标有笛卡儿直角坐标系和无因次自然坐标，有对称和不对称等。常采用的无因次坐标是一种局部坐标系，它的定义取决于单元的几何形状，一维看作长度比，二维看作面积比，三维看作体积比。

在二维有限元中，三角形单元应用得最早，近来四边形等单元的应用也越来越广。对于二维三角形和四边形单元，常采用的插值函数为有 Lagrange 插值直角坐标系中的线性插值函数及二阶或更高阶插值函数、面积坐标系中的线性插值函数、二阶或更高阶插值函数等。

对于有限元方法，其解题步骤可归纳为：

1）建立积分方程：根据变分原理或方程余量与权函数正交化原理，建立与微分方程初边值问题等价的积分表达式，这是有限元法的出发点。

2）区域单元剖分：根据求解区域的形状及实际问题的物理特点，将区域剖分为若干相互连接、不重叠的单元。区域单元划分是采用有限元方法的前期准备工作，这部分工作量比较大，除了给计算单元和节点进行编号和确定相互之间的关系之外，还要表示节点的位置坐标，同时还需要列出自然边界和本质边界的节点序号和相应的边界值。

3）确定单元基函数：根据单元中节点数目及对近似解精度的要求，选择满足一定插值条件的插值函数作为单元基函数。有限元方法中的基函数是在单元中选取的，由于各单元具有规则的几何形状，在选取基函数时可遵循一定的法则。

4）单元分析：将各个单元中的求解函数用单元基函数的线性组合表达式进行逼近；再将近似函数代入积分方程，并对单元区域进行积分，可获得含有待定系数（即单元中各节点的参数值）的代数方程组，称为单元有限元方程。

5）总体合成：在得出单元有限元方程之后，将区域中所有单元有限元方程按一定法则进行累加，形成总体有限元方程。

6）边界条件的处理：一般边界条件有 3 种形式，分为本质边界条件（狄里克雷边界条件）、自然边界条件（黎曼边界条件）、混合边界条件（柯西边界条件）。对于自然边界条件，一般在积分表达式中可自动得到满足。对于本质边界条件和混合边界条件，需按一定法则对总体有限元方程进行修正满足。

7）解有限元方程：根据边界条件修正的总体有限元方程组，是含所有待定未知量的封闭方程组，采用适当的数值计算方法求解，可求得各节点的函数值。

1.1.3 有限元的应用及其发展趋势

有限元的应用范围相当广泛，它涉及工程结构、传热、流体运动、电磁等连续介质的力学分析中，并在气象、地球物理、医学等领域得到应用和发展。电子计算机的出现和发展使有限元法在许多实际问题中的应用变为现实，并具有广阔的前景。

国际上早在 20 世纪 50 年代末至 60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局（NASA）在 1965 年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本，是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。

世界各地的研究机构和大学也随后研发了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件，主要有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、美国的 ABAQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。当今国际上 FEA 方法和软件发展呈现出以下一些趋势特征。

1．从单纯的结构力学计算发展到求解许多物理场问题

有限元分析方法最早是从结构化矩阵分析发展而来的，逐步推广到板、壳和实体等连续体固体力学分析，实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明，只要用于离散求解对象的单元足够小，所得的解就可足够逼近于精确值。

所以近年来有限元方法已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算，最近又发展到求解几个交叉学科的问题。

例如，当气流通过一个很高的铁塔时就会使铁塔产生变形，而塔的变形又反过来影响到气流的流动，这就需要用固体力学和流体动力学的有限元分析结果交叉迭代求解，即所谓“流固耦合”的问题。

2．由求解线性工程问题进展到分析非线性问题

随着科学技术的发展，线性理论已经远远不能满足设计的要求。例如，建筑行业中的高层建筑和大跨度悬索桥的出现，就要求考虑结构的大位移和大应变等几何非线性问题；航天和动力工程的高温部件存在热变形和热应力，也要考虑材料的非线性问题；随着塑料、橡胶和复合材料等各种新材料的出现，仅靠线性计算理论不足以解决遇到的问题，只有采用非线

性有限元算法才能解决。

众所周知，非线性的数值计算是很复杂的，它涉及很多专门的数学问题和运算技巧，很难为一般工程技术人员所掌握。为此近年来国外一些公司花费了大量的人力和物力来投资开发诸如 MARC、ABAQUS 和 ADINA 等专长于求解非线性问题的有限元分析软件，并广泛应用于工程实践。这些软件的共同特点是具有高效的非线性求解器以及丰富和实用的非线性材料库。



3．增强可视化的前置建模和后置数据处理功能

早期有限元分析软件的研究重点在于推导新的高效率求解方法和高精度的单元。随着数值分析方法的逐步完善，尤其是计算机运算速度的飞速发展，整个计算系统用于求解运算的时间越来越少，而数据准备和运算结果的表现问题却日益突出。

在现在的工程工作站上，求解一个包含 10 万个方程的有限元模型只需要用几十分钟。但是如果用手工方式来建立这个模型，然后再处理大量的计算结果则需用几周的时间。可以毫不夸张地说，工程师在分析计算一个工程问题时有 80%以上的精力都花在数据准备和结果分析上。因此目前几乎所有的商业化有限元程序系统都有功能很强的前置建模和后置数据处理模块。

在强调“可视化”的今天，很多程序都建立了对用户非常友好的 GUI（Graphics User Interface），使用户能以可视图形方式直观快速地进行网格自动划分，生成有限元分析所需数据，并按要求将大量的计算结果整理成变形图、等值分布云图，便于极值搜索和所需数据的列表输出。

4．与 CAD 软件的无缝集成

当今有限元分析系统的另一个特点是与通用 CAD 软件的集成使用，即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后，自动生成有限元网格并进行计算，如果分析的结果不符合设计要求则重新进行造型和计算，直到满意为止，从而提高设计水平和效率。

现在，工程师可以在集成的 CAD 和 FEA 软件环境中快捷地解决一个在以前无法应付的复杂工程分析问题。所以当今所有的商业化有限元系统开发商都开发了与 CAD 软件（例如 SpaceClaim、Pro/ENGINEER、CATIA、Unigraphics、SolidEdge、SolidWorks、IDEAS、Bentley 和 AutoCAD 等）的接口。

5．在 Wintel 平台上的发展

早期的有限元分析软件基本上都是在大中型计算机上开发和运行的，后来又发展到以工程工作站（Engineering WorkStation，EWS）为平台，它们的共同特点都是采用 UNIX 操作系统。计算机的出现使其应用发生了根本性变化，工程师渴望在办公桌上完成复杂工程分析的梦想成为现实。

但是早期的计算机采用 16 位 CPU 和 DOS 操作系统，内存中的公共数据块受到限制，因此当时计算模型的规模不能超过 1 万阶方程。Microsoft Windows 操作系统和 32 位的 Intel Pentium 处理器的推出为将计算机用于有限元分析提供了必需的软件和硬件支撑平台。因此当前国际上著名的有限元程序研究和发展机构都纷纷将自己的软件移植到 Windows 平台上。

在大力推广 CAD 技术的今天，从自行车到航天飞机，所有的设计制造都离不开有限元分析计算，有限元法在工程设计和分析中将得到越来越广泛的重视。目前以分析、优化和仿

真为特征的计算机辅助工程（Computer Aided Engineering，CAE）技术在世界范围内蓬勃发展。它通过先进的 CAE 技术快速有效地分析产品的各种特性、揭示结构各类参数变化对产品性能的影响，进行设计方案的修改和调整，使产品达到性能和质量上的最优，原材料消耗最低。因此，基于计算机的分析、优化和仿真的 CAE 技术的研究和应用，是高质量、高水平、低成本产品设计与开发的保证。

1.2 有限元分析基本理论

有限元法的基本思路是将一个连续求解区域分割成有限个不重叠且按一定方式相互连接在一起的子域（单元），利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。

单元内的场函数通常由未知场函数或其导数在单元各个节点的数值和其插值函数来近似表示。这样，未知场函数或其导数在各个节点上的数值即成为未知量（自由度）。

根据单元在边界处相互之间的连续性，将各单元的关系式集合成方程组，求出这些未知量，并通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值，从而得到全求解域上的近似解。

有限元将一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题进行求解。如果将区域划分成很细的网格，即单元的尺寸变得越来越小，或随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高，解的近似程度将不断被改进。如果单元是满足收敛要求的，近似解最后可收敛于精确解。

1.2.1 有限元分析的基本概念和计算步骤

首先以求解连续梁为例，引出结构有限元分析的一些基本概念和计算步骤。

图 1-1 所示为连续梁承受集中力矩作用示意图。将结构离散为 3 个节点，两个单元。结构中的节点编号为 1、2、3，单元编号为①、②。

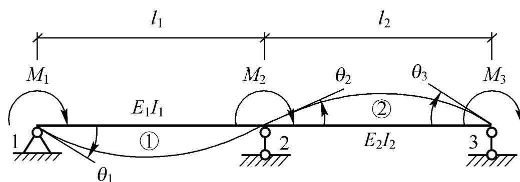


图 1-1　受集中力矩作用的连续梁

1．单元分析

在有限元分析过程中，第一步是进行结构离散，并对离散单元进行分析，分析的目的是得到单元节点的力与位移的关系。单元分析的方法有直接法和能量法两种，本节采用直接法。

从连续梁中取出一个典型单元 e，左边为节点 i，右边为节点 j。将节点选择在支承点处，单元两端只产生转角位移 θ_i^e 、θ_j^e，顺时针转动为正。独立的单元杆端内力为弯矩 m_i 、m_j，顺时针为正。

记：$\boldsymbol{u}^e=\begin{pmatrix}\theta_i^e\\\theta_j^e\end{pmatrix}$为单元 $\boldsymbol{e}$ 的节点位移向量；$\boldsymbol{f}^e=\begin{pmatrix}m_i^e\\m_j^e\end{pmatrix}$为单元 $\boldsymbol{e}$ 的杆端力向量。

根据结构力学位移法可得如下平衡方程

$$\begin{cases}m_i^e=k_{11}^e\theta_i^e+k_{12}^e\theta_j^e\\m_j^e=k_{21}^e\theta_i^e+k_{22}^e\theta_j^e\end{cases}\tag{1-1}$$

式中，$k_{11}^e=k_{22}^e=4i_e$，$k_{21}^e=k_{12}^e=2i_e$，$i_e=\dfrac{EI}{l}$，EI、l 分别为单元 e 的抗弯刚度和长度。

k_{ij}^e(i，j=1，2)的物理意义为单元 j 处发生单位转角引起的 i 处的力矩，将式（1-1）写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix}m_i^e\\m_j^e\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}k_{11}^e & k_{12}^e\\k_{21}^e & k_{22}^e\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\theta_i^e\\\theta_j^e\end{pmatrix}\tag{1-2}$$

或

$$\boldsymbol{f}^e=\boldsymbol{k}^e u^e\tag{1-3}$$

式（1-2）和式（1-3）称为梁单元 e 的刚度方程。其中，$\boldsymbol{k}^e$ 称为梁单元 e 的刚度矩阵，只要已知梁单元的 EI、l 就可计算出单元刚度矩阵。

以上分析实现了单元分析的目的，即得到单元刚度方程和单元刚度矩阵。

2．整体分析

有限元分析的第二步要将离散的单元集成整体，组集过程如图 1-2 所示。在组集过程中，必须满足以下条件

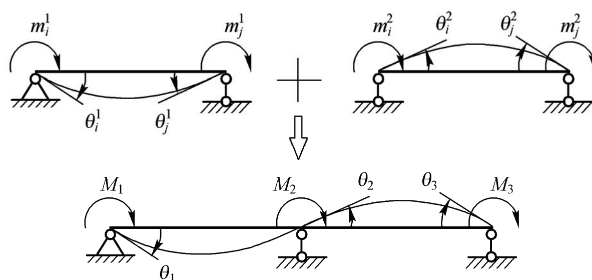


图 1-2 离散的单元集成整体

（1）变形协调

$$\begin{cases}\theta_i^1=\theta_1\\\theta_j^1=\theta_i^2=\theta_2\\\theta_j^2=\theta_3\end{cases}\tag{1-4}$$

（2）节点平衡

$$\begin{cases} \sum M_1 = 0 & M_1 - m_i^1 = 0 \\ \sum M_2 = 0 & M_2 - m_i^2 - m_j^1 = 0 \\ \sum M_3 = 0 & M_3 - m_j^2 = 0 \end{cases} \tag{1-5}$$

式（1-2）代入式（1-5）可得

$$\begin{cases} 4i_1\theta_i^1 + 2i_1\theta_j^1 = M_1 \\ (2i_1\theta_i^1 + 4i_1\theta_j^1) + (4i_2\theta_i^2 + 2i_2\theta_j^2) = M_2 \\ 2i_2\theta_i^2 + 4i_2\theta_j^2 = M_3 \end{cases} \tag{1-6}$$

式（1-4）代入式（1-6）整理可得

$$\begin{cases} 4i_1\theta_1 + 2i\theta_2 = M_1 \\ 2i_1\theta_1 + (4i_1 + 4i_2)\theta_2 + 2i_2\theta_3 = M_2 \\ 2i_2\theta_2 + 4i_2\theta_3 = M_3 \end{cases} \tag{1-7}$$

写成矩阵形式，得

$$\begin{pmatrix} 4i_1 & 2i_1 & 0 \\ 2i_1 & (4i_1 + 4i_2) & 2i_2 \\ 0 & 2i_2 & 4i_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} \tag{1-8}$$

式（1-8）称为结构刚度方程，它实际上是结构的节点平衡方程，记为

$$\boldsymbol{K\Delta} = \boldsymbol{P} \tag{1-9}$$

式中，$\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} 4i_1 & 2i & 0 \\ 2i_1 & (4i_1 + 4i_2) & 2i_2 \\ 0 & 2i_2 & 4i_2 \end{pmatrix}$称为该结构的原始刚度矩阵；$\boldsymbol{\Delta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^{\mathrm{T}}$称为该结构的位移向量；$\boldsymbol{P} = (M_1, M_2, M_3)^{\mathrm{T}}$称为该结构的节点荷载向量。

以上分析实现了整体分析，即得到结构原始刚度矩阵和结构刚度方程。

3．用直接刚度法形成结构刚度矩阵

通过整体分析，建立了节点的平衡方程，即结构的刚度方程，从而得到结构刚度矩阵。但是，要实现电算，不可能对每一具体结构都作一次总体分析，而应该找一种规律，在确定了节点位移和荷载的排序后，使计算机能够直接由单元刚度矩阵集成结构刚度矩阵，从单元刚度方程得到结构的刚度方程，这一方法称为直接刚度法。下面介绍用直接刚度法直接由单元刚度矩阵集成结构刚度矩阵的过程。

（1）确定结构刚度矩阵的阶数

结构刚度方程中第 i 行，表示该结构第 i 个位移分量上力的平衡方程，因此，如果结构有 N 个独立位移分量，就可列出 N 个独立平衡方程，结构刚度矩阵就是 $N\times N$ 阶的。本例有 3 个独立的位移分量，故总刚必然为 3×3 阶的，写成

$$\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \tag{1-10}$$

（2）确定单元刚度矩阵中元素与结构刚度矩阵中元素的关系

若将单元刚度矩阵下标写成位移分量编号的形式。

单元 1：$i=1$，$j=2$

$$\boldsymbol{K}^{1}=\begin{pmatrix} k_{11}^{1} & k_{12}^{1} \\ k_{21}^{1} & k_{22}^{1} \end{pmatrix} \tag{1-11}$$

单元 2：$i=2$，$j=3$

$$\boldsymbol{K}^{2}=\begin{pmatrix} k_{22}^{2} & k_{23}^{2} \\ k_{32}^{2} & k_{33}^{2} \end{pmatrix} \tag{1-12}$$

则有：$k_{11}=k_{11}^{1}$，$k_{12}=k_{12}^{1}$，$k_{13}=0$，$k_{21}=k_{21}^{1}$，$k_{22}=k_{22}^{1}+k_{22}^{2}$，$k_{23}=k_{23}^{2}$，$k_{31}=0$，$k_{32}=k_{32}^{2}$，$k_{33}=k_{33}^{2}$。

可见，若将单元刚度矩阵中元素下标写成位移分量编号的形式，则结构刚度矩阵中任一刚度元素与单元刚度矩阵中元素有关系

$$k_{ij}=\sum_{e=1}^{ne}k_{ij}^{e} \tag{1-13}$$

式中，e 为单元号，ne 为结构单元总数

因此，用直接刚度法集成总刚，可归纳为以下几步：

1）结构未知量进行编号，确定各未知量在结构刚度方程中的位置（行号）。

2）确定结构刚度矩阵的阶数 N。

3）对单元 e 进行循环，寻找 e 单元刚度矩阵中各元素下标对应于整体刚度方程中的未知量编号；并按此编号，根据式（1-13）分别叠加到结构总体刚度矩阵中的对应位置上去。

对单元循环完毕时，结构刚度矩阵就形成了。形成结构刚度矩阵是有限元分析过程中十分重要的环节，为了节约计算机存储空间，加快刚度方程求解速度，还必须了解结构刚度矩阵具有如下性质：

1）结构刚度矩阵是 $N\times N$ 阶的方阵，N 为结构的未知量总数。

2）结构刚度矩阵是对称阵，即 $k_{ij}=k_{ji}$，这一性质由力-位移互等定理决定。

3）处于同一单元上的两个未知量称相关未知量。若两个未知量不相关，则 $k_{ij}=0$。由式（1-13）可知，两个未知量不相关，就没有单元刚度矩阵贡献，因此 $k_{ij}=0$，如本例中 $k_{13}=k_{31}=0$。

4）结构刚度矩阵为带状矩阵，其非 0 元素分布在主对角线元素附近。

5）结构刚度矩阵是稀疏阵，非 0 元素很少。对于较大规模的结构，结构刚度矩阵中的非 0 元素只占总元素的 10%左右。

6）结构刚度矩阵是非负定矩阵，即对任意不为 0 的 N 维向量 $\boldsymbol{x}$ 有：$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}\geqslant 0$。

4．支承条件的引入

在有限元分析过程中，通常在结构原始刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 建立以后，才引入支承条件。下面仍对本例进行讨论。如果改变本例中节点 3 的边界条件，如图 1-3 所示，在节点 1 和 2 处转

角θ_1、θ_2是未知量，节点力M_1、M_2是已知量，节点 3 是固定端，M_3为未知量，转角θ_3是已知量，即$\theta_3 = 0$。

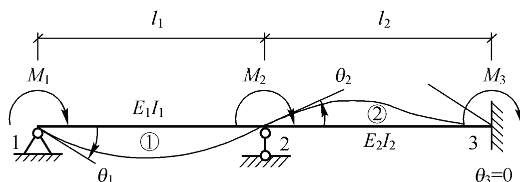


图 1-3　改变节点边界条件的连续梁

计算时，分两步来进行：

第一步，暂不引入支承条件和荷载情况，先建立原始刚度方程，即式（1-8）。

第二步，在固定端引入支承条件$\theta_3 = 0$，即将式（1-8）修改为

$$\begin{pmatrix} 4i_1 & 2i & 0 \\ 2i_1 & (4i_1 + 4i_2) & 2i_2 \\ 0 & 2i_2 & 4i_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{pmatrix} \tag{1-14}$$

为了求解θ_1、θ_2，可从矩阵方程中取出前面两个方程，即为

$$\begin{cases} 4i\theta_1 + 2i\theta_2 = M_1 \\ 2i\theta_1 + (4i_1 + 4i_2)\theta_2 = M_2 \end{cases} \tag{1-15}$$

即

$$\begin{pmatrix} 4i & 2i \\ 2i & 4i_1 + 4i_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix} \tag{1-16}$$

式（1-16）就是引入支承条件和荷载情况后得到的位移法基本方程，由此可解出基本未知量θ_1、θ_2。

将式（1-16）与式（1-8）相比较可以看出，如果在式（1-8）中把 $\boldsymbol{K}$ 的第 3 行和第 3 列划去，同时把右边向量中的相应元素划去，就可直接得出式（1-16）。因此，引入支承条件的问题就归结为划去对应未知量的行与列的问题，这种方法称为划行划列法。

有时，为了能方便地计算出支反力，可以将式（1-8）写成

$$\begin{pmatrix} k_{\alpha\alpha} & k_{\alpha\beta} \\ k_{\beta\alpha} & k_{\beta\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Delta}_\alpha \\ \boldsymbol{\Delta}_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{pmatrix} \tag{1-17}$$

式中　$\boldsymbol{\Delta}_\alpha$——$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$，未知位移量；

$\boldsymbol{\Delta}_\beta$——$(\theta_3)$，已知位移；

$\boldsymbol{P}_\alpha$——$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix}$，已知荷载向量；

$\boldsymbol{P}_\beta$——(M_3)，未知荷载向量或支反力。

式（1-17）可写成如下两个独立方程组

$$\boldsymbol{k}_{\alpha\alpha}\boldsymbol{\Delta}_\alpha + \boldsymbol{k}_{\alpha\beta}\boldsymbol{\Delta}_\beta = \boldsymbol{P}_\alpha \tag{1-18}$$

$$\boldsymbol{k}_{\beta\alpha}\boldsymbol{\Delta}_\alpha + \boldsymbol{k}_{\beta\beta}\boldsymbol{\Delta}_\beta = \boldsymbol{P}_\beta \tag{1-19}$$

由于$\boldsymbol{\Delta}_\beta = (\theta_3) = 0$，所以式（1-18）等价于式（1-16）。

当$\boldsymbol{\Delta}_\alpha$求得后，代入式（1-19）则可求得支反力

$$\boldsymbol{P}_\beta = \boldsymbol{k}_{\beta\alpha}\boldsymbol{\Delta}_\alpha + 0 \tag{1-20}$$

对于本例，即

$$\boldsymbol{M}_3 = \boldsymbol{k}_{\beta\alpha}\boldsymbol{\Delta}_\alpha = (0 \quad 2i_2)\begin{pmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{pmatrix} = 2i_2\theta_2 \tag{1-21}$$

由此可见，要计算支反力，必须先将已知位移对应的刚度矩阵元素$\boldsymbol{k}_{\beta\alpha}$提取出来，然后再划行划列。

在程序计算中，希望将引入支座后的矩阵仍保留原来的阶数且未知量排列顺序不变，为此，可将式（1-16）扩大成

$$\begin{pmatrix}4i_1 & 2i_1 & 0\\ 2i_1 & (4i_1+4i_2) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\theta_1\\ \theta_2\\ \theta_3\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}P_1\\ P_2\\ 0\end{pmatrix} \tag{1-22}$$

即对原始刚度矩阵先提取对应于已知位移向量的刚度元素，以备计算支座反力，再将原始刚度矩阵中这些元素全部置0，对角线元素置1。荷载向量中对应的元素也置0。这种处理约束的方法称为充0置1法。

5．非节点荷载的处理

如果在单元内有非节点荷载，就不可能直接建立结构刚度方程，因为结构刚度方程表示的是节点力的平衡方程。图1-4a所示结构具有3个节点，2个单元，M_1、M_2、M_3为节点荷载，M'、M''为非节点荷载。

要解决这个问题，需用等效节点荷载来代替非节点荷载来分析整体结构受力，处理原则为在等效节点荷载作用下的结构节点位移与实际荷载作用下结构的节点位移应相等。具体可按如下步骤处理：

（1）求等效节点荷载

计算非节点荷载的等效节点荷载时可分两步进行。

第一步：在各节点加上约束，阻止节点发生位移，计算结构上所有非节点荷载的效应，如图1-4b所示，其中M_{01}、M_{02}、M_{03}为非节点荷载在增加的约束中引起的反力（弯矩）。

单元（1）、（2）产生的固定端力矩（加脚标0表示固定端力矩）为

$$\boldsymbol{M}_0^{(1)} = \begin{pmatrix}M_{0i}\\ M_{0j}\end{pmatrix}^{(1)}, \quad \boldsymbol{M}_0^{(2)} = \begin{pmatrix}M_{0i}\\ M_{0j}\end{pmatrix}^{(2)} \tag{1-23}$$

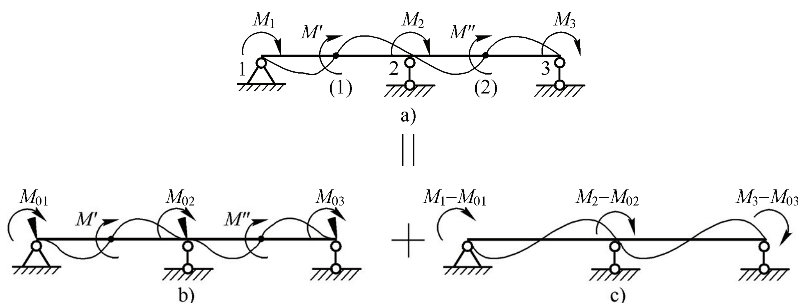


图 1-4　单元内有非节点荷载作用的连续梁

各节点增加的约束中的反力分别为与该节点相关联单元的固定端力矩之和，即

$$\boldsymbol{M}_0=\begin{pmatrix}M_{01}\\M_{02}\\M_{03}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}M_{0i}^{(1)}\\M_{0j}^{(1)}+M_{0i}^{(2)}\\M_{0j}^{(2)}\end{pmatrix}\tag{1-24}$$

第二步：去掉各节点的约束，相当于在各节点施加外力矩向量 $\boldsymbol{P}=-\boldsymbol{M}_0$；再叠加上原有的节点荷载 M_1、M_2、M_3，总的节点荷载如图 1-4c 所示。

显然，把图 1-4b 和图 1-4c 两种情况叠加就得到图 1-4a 给出的情况。图 1-4c 中的节点荷载$\{\boldsymbol{P}\}$称为结构非节点荷载的等效节点荷载，而式（1-24）中的单元固定端力矩 $\boldsymbol{M}_0^{(1)}$、$\boldsymbol{M}_0^{(2)}$ 的反号力叫做相应单元荷载的等效节点荷载。

（2）求各杆端弯矩

连续梁在非节点荷载作用下的杆端弯矩由两部分组成，一部分是在节点加阻止位移的约束时非节点荷载作用下的杆端弯矩；另一部分是在等效节点力荷载作用下的杆端弯矩。第二部分的计算方法在前面已详细讨论，即先由式（1-8）求出结构的位移向量$\{\Delta\}$，然后代入式（1-2）计算杆端力。

将两部分杆端力进行叠加，即得非节点荷载作用下各杆的杆端弯矩。

$$\begin{pmatrix}M_i^e\\M_j^e\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}k_{11}^e & k_{12}^e\\k_{21}^e & k_{22}^e\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\theta_i^e\\\theta_j^e\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}M_{0i}^e\\M_{0j}^e\end{pmatrix},\quad e=1,2\tag{1-25}$$

6．有限元分析的基本步骤

有限元分析的实施过程可分为 3 个阶段。

- 前处理阶段：将整体结构或其一部分简化为理想的数学力学模型，用离散化的单元代替连续实体结构或求解区域。
- 分析计算阶段：运用有限元法对结构离散模型进行分析计算。
- 后处理阶段：对计算结果进行分析、整理和归纳。

以上讨论尽管只是针对两跨连续梁进行的，但其分析阶段的思想及计算步骤却代表了所有复杂结构的有限元静力分析过程。因此，读者必须熟练掌握这一过程的每一环节，领会其分析思路。为了便于理解，将有限元分析的基本步骤归纳成以下几点。

1）结构简化与离散化，并对离散结构进行单元、节点编号。

2）整理原始数据，包括单元、节点、材料、几何特性、荷载信息等。

3）形成各单元的单元刚度矩阵。

4）形成结构原始刚度矩阵。

5）形成结构荷载向量，它是节点力与非节点力的总效应。

6）引入支承条件。

7）解方程计算节点位移。

8）求各单元内力和各支承反力。

不同结构的有限元分析具有以下区别。

1）描述结构的单元形式不同——一种单元将对应一种单元刚度。

2）单元的节点未知量个数不同——平面刚架单元为 3，空间刚架单元为 6 等。

针对具体结构形式，可以做具体的有限元分析。桥梁结构一般为空间复合结构，它的离散模型可由梁、板、壳以及三维实体单元组合而成，复杂结构的单元分析一般采用能量法推导。但为了简化计算，一般可近似为杆系结构，因此，下一节将用能量法描述有限元分析原理和单元分析方法。

1.2.2 基于最小势能原理的有限元法

1．基本理论

采用最小势能原理建立有限元方程可以归结为以下步骤。

1）以单元坐标系中的单元节点位移 $\boldsymbol{\delta}^e$ 为待定参数，引入插值函数 $\boldsymbol{N}^e$，给出单元内的位移函数

$$\boldsymbol{a}^e = \boldsymbol{N}^e \boldsymbol{\delta}^e \tag{1-26}$$

2）用单元节点位移 $\boldsymbol{\delta}^e$ 表示单元应变和单元应力

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = L\boldsymbol{a}^e = \boldsymbol{B}^e \boldsymbol{\delta}^e \tag{1-27}$$

$$\boldsymbol{\sigma}^e = \boldsymbol{D}^e \boldsymbol{\varepsilon}^e = \boldsymbol{D}^e \boldsymbol{B}^e \boldsymbol{\delta}^e \tag{1-28}$$

式中，$\boldsymbol{B}^e = L\boldsymbol{N}^e$，称为应变（几何）矩阵；$L$ 为一阶微分算子；$\boldsymbol{D}^e$ 为弹性矩阵。

3）每个单元的势能

$$\Pi_p^e = \boldsymbol{\delta}^{e\mathrm{T}} \left(\frac{1}{2}\int_{V^e} \boldsymbol{B}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{D}^e \boldsymbol{B}^e \mathrm{d}v \boldsymbol{\delta}^e - \int_{V^e} \boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{f}^e \mathrm{d}v - \int_{S_0^e} \boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{H}^e \mathrm{d}s\right) - \boldsymbol{\delta}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{P_F}^e \tag{1-29}$$

式中，$\boldsymbol{f}^e$ 为单元的体积力；$\boldsymbol{H}^e$ 为单元的表面力；$\boldsymbol{P_F}^e$ 为单元的节点力。

4）根据最小势能原理 $\delta \Pi_p^e = 0$，建立单元坐标系内的单元刚度方程

$$\boldsymbol{k}^e \boldsymbol{\delta}^e = \boldsymbol{p}^e \tag{1-30}$$

$$\boldsymbol{k}^e = \int_{V^e} \boldsymbol{B}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{D}^e \boldsymbol{B}^e \mathrm{d}v \tag{1-31}$$

$$\boldsymbol{p}^e = \int_{V^e} \boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{f}^e \mathrm{d}v + \int_{S_0^e} \boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}} \boldsymbol{H}^e \mathrm{d}s + \boldsymbol{P_F}^e \tag{1-32}$$

式中，$\boldsymbol{k}^e$ 为单元坐标系中的单元刚度矩阵；$\boldsymbol{p}^e$ 为单元坐标系中的右端荷载向量。

5）用结构坐标系内的节点位移 $\boldsymbol{\delta}$ 表示单元坐标系内的节点位移 $\boldsymbol{\delta}^e$

$$\boldsymbol{\delta}^e = \boldsymbol{T}^e\boldsymbol{\delta} \tag{1-33}$$

式中，$\boldsymbol{T}^e$ 为单元的转换矩阵。

6）得到系统总势能的离散形式

$$\Pi_p = \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\sum_e \boldsymbol{T}^{e\mathrm{T}}(\frac{1}{2}\int_{V^e}\boldsymbol{B}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^e\boldsymbol{B}^e\mathrm{d}v\boldsymbol{T}^e\boldsymbol{\delta} - \int_{V^e}\boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{f}^e\mathrm{d}v - \int_{S_0^e}\boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^e\mathrm{d}s) - \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P_F} \tag{1-34}$$

7）根据最小势能原理 $\delta\Pi_p = 0$，建立结构的总体刚度方程

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{P} \tag{1-35}$$

$$[K] = \sum_e \boldsymbol{T}^{e\mathrm{T}}\int_{V^e}\boldsymbol{B}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^e\boldsymbol{B}^e\mathrm{d}v\boldsymbol{T}^e = \sum_e \boldsymbol{T}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{k}^e\boldsymbol{T}^e \tag{1-36}$$

$$\{P\} = \sum_e \boldsymbol{T}^{e\mathrm{T}}\left(\int_{V^e}\boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{f}^e\mathrm{d}v + \int_{S_0^e}\boldsymbol{N}^{e\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^e\mathrm{d}s\right) + \boldsymbol{P_F} \tag{1-37}$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 为总体刚度矩阵；$\boldsymbol{P}$ 为总体右端荷载向量。

8）在式（1-35）中引入强制边界条件，解方程得到节点位移。

9）进行必要的辅助计算得到结构中的内力、应力以及约束反力等。

2．二力杆单元的刚度方程

假设应力在截面上均匀分布，原来垂直于轴线的截面变形后仍保持和轴线垂直，问题可以简化为一维问题。基本未知量是轴向位移函数 $u^e(x)$，承受轴向荷载的等截面二力杆单元的基本方程如下。

几何方程为
$$\varepsilon^e(x) = \mathrm{d}[u^e(x)]/\mathrm{d}x \tag{1-38}$$

物理方程为
$$\sigma^e(x) = E^e\varepsilon^e(x) = E^e\,\mathrm{d}[u^e(x)]/\mathrm{d}x \tag{1-39}$$

平衡方程为
$$\frac{\mathrm{d}[A^e\sigma^e(x)]}{\mathrm{d}x} = f(x) \quad 或 \quad A^eE^e\frac{\mathrm{d}^2[u^e(x)]}{\mathrm{d}x^2} = f(x) \tag{1-40}$$

边界条件为
$$u^e(0) = u_0{}^e, u^e(l^e) = u_{l^e}{}^e \quad （端部给定位移） \tag{1-41}$$

$$A^e\sigma^e(0) = P_0{}^e, A^e\sigma^e(l^e) = P_{l^e}{}^e \quad （端部给定荷载） \tag{1-42}$$

与上述方程等效，可将问题转换为求解泛函（势能）的极值问题

$$\Pi_p^e(u^e) = \int_0^{l^e}\frac{E^eA^e}{2}\left(\frac{\mathrm{d}u^e}{\mathrm{d}x}\right)^2\mathrm{d}x - \int_0^{l^e}f^e(x)u^e\mathrm{d}x \tag{1-43}$$

式中，$f^e(x)$ 为单元上的分布荷载，集中荷载（包括节点荷载）作为分布荷载的特殊情况也包括在内。对二力杆单元，杆端有两个位移：

$$\boldsymbol{u}^e = (u_i \quad u_j)^{\mathrm{T}} \tag{1-44}$$

取插值函数为

$$\boldsymbol{N}=\begin{pmatrix}1-\dfrac{x}{l} & \dfrac{x}{l}\end{pmatrix} \tag{1-45}$$

有 $u^e(x)=\boldsymbol{N}\boldsymbol{u}^e$，代入泛函并从 $\delta\Pi_p^e=0$ 得到单元刚度方程为

$$\boldsymbol{k}^e\boldsymbol{u}^e=\boldsymbol{p}^e \tag{1-46}$$

式中，$\boldsymbol{k}^e$ 为等截面二力杆单元的单元刚度矩阵；$\boldsymbol{p}^e$ 为单元右端荷载向量

$$\boldsymbol{k}^e=\int_0^{l^e}E^eA^e\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{N}}{\mathrm{d}x}\right)^{\mathrm{T}}\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{N}}{\mathrm{d}x}\right)\mathrm{d}x=\frac{E^eA^e}{l^e}\begin{pmatrix}1 & -1\\ -1 & 1\end{pmatrix} \tag{1-47}$$

$$\boldsymbol{p}^e=\int_0^{l^e}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}f^e(x)\mathrm{d}x \tag{1-48}$$

3．自由扭转杆单元的刚度方程

在自由扭转情况下，等截面直杆承受扭矩荷载作用，基本未知量是转角位移函数 $\theta_x^e(x)$，其基本方程为：

几何方程为
$$\alpha^e(x)=\frac{\mathrm{d}\theta_x^e(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-49}$$

物理方程为
$$M_x^e(x)=G^eJ^e\alpha^e(x)=G^eJ^e\frac{\mathrm{d}\theta_x^e(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-50}$$

平衡方程为
$$\frac{\mathrm{d}M_x^e(x)}{\mathrm{d}x}=G^eJ^e\frac{\mathrm{d}^e\theta_x^e(x)}{\mathrm{d}x^2}=m_x^e(x) \tag{1-51}$$

边界条件为
$$\theta_x^e(0)=\theta_{x0}{}^e,\theta_x^e(l^e)=\theta_{xl^e}{}^e\ \text{（端部给定转角）} \tag{1-52}$$

$$M_x^e(0)=M_{xo}^e,M_x^e(l^e)=M_{xl^e}^e\ \text{（端部给定扭矩）} \tag{1-53}$$

与上述方程等效，可将问题转换为求解泛函（势能）

$$\Pi_p^e\left(\theta_x^e\right)=\int_0^{l^e}\frac{G^eJ^e}{2}\left(\frac{\mathrm{d}\theta_x^e}{\mathrm{d}x}\right)^2\mathrm{d}x-\int_0^{l^e}m_x^e(x)\theta_x^e\mathrm{d}x \tag{1-54}$$

的极值问题。式中，$m_x^e(x)$ 为单元的分布扭矩，集中扭矩（包括节点扭矩）作为分布扭矩的特殊情况也包括在内。

对两节点扭转杆单元，杆端有两个位移，即

$$\boldsymbol{\theta}_x{}^e=\left(\theta_{xi},\theta_{xj}\right)^{\mathrm{T}} \tag{1-55}$$

取插值函数为

$$\boldsymbol{N}=\left(1-\frac{x}{l},\frac{x}{l}\right) \tag{1-56}$$

有 $\theta_x^e(x)=\boldsymbol{N}\boldsymbol{\theta_x}^e$，代入泛函并从 $\delta\Pi_p^e=0$ 得到单元刚度方程为

$$\boldsymbol{k}^e\boldsymbol{\theta_x}^e=\boldsymbol{p}^e \tag{1-57}$$

式中，$\boldsymbol{k}^e$ 为等截面自由扭转杆单元的单元刚度矩阵；$\boldsymbol{p}^e$ 为单元右端荷载向量，得到

$$\boldsymbol{k}^e=\int_0^{l^e}G^eJ^e\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{N}}{\mathrm{d}x}\right)^{\mathrm{T}}\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{N}}{\mathrm{d}x}\right)\mathrm{d}x=\frac{G^eJ^e}{l^e}\begin{pmatrix}1&-1\\-1&1\end{pmatrix} \tag{1-58}$$

$$\boldsymbol{p}^e=\int_0^{l^e}\boldsymbol{N}^Tm_x^e(x)\mathrm{d}x \tag{1-59}$$

4．平面梁单元的刚度方程

在经典的梁弯曲理论中，假设变形前垂直于直梁中心线的截面变形后仍保持为平面，且仍垂直于中心线，从而使梁弯曲问题简化为一维问题。基本未知函数是中面挠曲函数 $w^e(x)$，弯曲问题的基本方程如下。

几何关系为
$$\kappa^e(x)=-\frac{\mathrm{d}^2w^e(x)}{\mathrm{d}x^2} \tag{1-60}$$

物理方程为
$$M^e(x)=E^eI^e\kappa^e(x)=-E^eI^e\frac{\mathrm{d}^2w^e(x)}{\mathrm{d}x^2} \tag{1-61}$$

平衡方程为
$$Q^e(x)=\frac{\mathrm{d}M^e(x)}{\mathrm{d}x}=-E^eI^e\frac{\mathrm{d}^3M^e(x)}{\mathrm{d}x^3}-\frac{\mathrm{d}Q^e(x)}{\mathrm{d}x}=E^eI^e\frac{\mathrm{d}^4M^e(x)}{\mathrm{d}x^4}=q^e(x) \tag{1-62}$$

边界条件为 $w^e=\overline{w}^e$ 且 $\frac{\mathrm{d}w^e}{\mathrm{d}x}=\overline{\theta}^e$（$x=0$ 或 $x=l^e$）

或 $w^e=\overline{w}^e$ 且 $M=\overline{M}$（$x=0$ 或 $x=l^e$）

或 $Q=\overline{Q}$ 且 $M=\overline{M}$（$x=0$ 或 $x=l^e$）（1-63）

式中，$\kappa^e(x)$ 是梁中面的曲率，3 种边界条件为 0 时分别对应于固定端、简支端、自由端。

与上述方程等效，可将问题转换为求解泛函（势能）

$$\Pi_p^e\left(w^e\right)=\int_0^{l^e}\frac{1}{2}E^eI^e\left(\frac{\mathrm{d}^2w^e}{\mathrm{d}x^2}\right)^2\mathrm{d}x-\int_0^{l^e}q^e(x)w^e\mathrm{d}x-\sum_j P_j^ew_j^e+\sum_k M_k^e\left(\frac{\mathrm{d}w^e}{\mathrm{d}x}\right)_k \tag{1-64}$$

的极值问题。式中，$q^e(x)$ 为单元的分布荷载；P_j^e、M_k^e 分别为集中横向力和集中弯矩。

在分析梁弯曲问题时，通常采用两节点埃尔米特（Hermite）弯曲梁单元，杆端有 4 个位移

$$\boldsymbol{\delta}^e=(w_i,\theta_i,w_j,\theta_j)^{\mathrm{T}} \tag{1-65}$$

插值函数为：

$$N=\left(\frac{2x^3}{l^3}-\frac{3x^2}{l^2}+1,\quad \frac{x^3}{l^2}-\frac{2x^2}{l}+x,\quad -\frac{2x^3}{l^3}+\frac{3x^2}{l^2},\quad \frac{x^3}{l^2}-\frac{x^2}{l}\right) \tag{1-66}$$

有 $w^e(x)=N\delta^e$，代入泛函并从 $\delta\Pi_p^e=0$ 得到单元刚度方程为：

$$k^e\delta^e=p^e \tag{1-67}$$

式中，k^e 为等截面梁单元的单元刚度矩阵；p^e 为单元右端荷载向量。

$$k^e=\int_0^{l^e}E^eI^e\left(\frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}x^2}\right)^{\mathrm{T}}\left(\frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}x^2}\right)\mathrm{d}x=\frac{E^eI^e}{l^{e3}}\begin{pmatrix}12 & 6l^e & -12 & 6l^e\\ 6l^e & 4l^{e2} & -6l^e & 2l^{e2}\\ -12 & -6l^e & 12 & -6l^e\\ 6l^e & 2l^{e2} & 6l^e & 4l^{e2}\end{pmatrix} \tag{1-68}$$

$$p^e=\int_0^{l^e}N^{\mathrm{T}}q^e(x)\mathrm{d}x+\sum_j N_{x_j}^{\mathrm{T}}P_j-\sum_k\left.\frac{\mathrm{d}N^{\mathrm{T}}}{\mathrm{d}x}\right|_{x_j}M_k \tag{1-69}$$

1.2.3 杆系结构的非线性分析理论

1．概述

固体力学中有 3 组基本方程，即本构方程、几何运动方程和平衡方程。经典线性理论基于 3 个基本假定，即材料的应力、应变关系满足广义胡克定律；位移是微小的；约束是理想约束。这些假定使得 3 组基本方程成为线性。只要基本假定中任何一个失效时，问题就转化为非线性。表 1-1 给出了非线性问题的分类及基本特点。

表 1-1 非线性问题的分类及基本特点

非线性问题	定义	特点	桥梁工程中的典型问题
材料非线性	由材料的非线性应力、应变关系引起基本控制方程的非线性问题	材料不满足胡克定律	混凝土徐变、收缩和弹塑性问题
几何非线性	放弃小位移假设，从几何上严格分析单元体的尺寸、形状变化，得到非线性的几何运动方程，由此造成基本控制方程的非线性问题	几何运动方程为非线性。平衡方程建立在结构变形后的位置上，结构刚度除了与材料及初始构形有关外，与受载后的应力、位移也有关	柔性结构的恒载状态确定问题，柔性结构的恒、活载计算问题；桥梁结构的稳定分析问题
接触问题	不满足理想约束假定而引起的边界约束方程的非线性问题	受力后的边界条件在求解前未知	悬索桥主缆与鞍座的接触状态；支架上预应力梁张拉后的部分落架现象

几何非线性理论将平衡方程建立在结构变形后位置上。以图 1-5 所示结构为例，按线性理论求解就无法找到平衡位置。按几何非线性分析方法处理，在外力 P 作用下，B 点产生竖向位移，当位移达到一定值δ 时，AB、BC 两杆件中轴力的竖向分力与 P 平衡，δ 即为 B 点位移的解。可见，受力状态因变形而发生明显改变时，就必须用几何非线性方法进行分析。

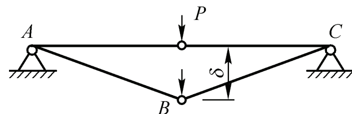


图 1-5 受集中力的二力杆

凡是在本构关系中放弃材料线性关系假定的理论，均属材料非线性范畴。根据不同的材料形态，又可以分成表 1-2 给出的几种不同的材料非线性问题。

桥梁结构以钢和混凝土作为主要材料，因此，涉及的材料非线性主要是非线性弹塑性问题和混凝土徐变问题。

表 1-2　几种材料非线性问题

材料非线性问题	特　征
非线性弹性	● 本构方程仅有应力、应变两参数 ● 卸载后无残余应变存在
非线性塑性	● 本构方程仅有应力、应变两参数 ● 卸载后有残余应变存在
金属蠕变与混凝土徐变	即使荷载不变，随着时间的变化，结构也会发生明显的变形
粘弹性	● 应力－应变关系为弹性性质 ● 应力－应变关系与加载速率有关
粘塑性	● 超过屈服应力时，材料呈弹塑性性质 ● 应力－应变关系与应变率有关

2．几何非线性分析

在整个分析过程中，以 t=0 时的构形作为参考，且参考位形保持不变，这种列式称为总体拉格朗日列式（T.L 列式）。

以杆系结构为例，对于任意应力－应变关系与几何运动方程，杆单元的平衡方程可由虚功原理推导得到

$$\int_V \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V - \boldsymbol{f} = 0 \tag{1-70}$$

式中，$\boldsymbol{\sigma}$——单元的应力向量；

$\boldsymbol{f}$——单元杆端力向量；

V——单元体积分域，对 T.L 列式 V 是变形前的单元体积域；

$\boldsymbol{B}$——应变矩阵，是单元应变与节点位移的关系矩阵，即

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{B}\mathrm{d}\boldsymbol{\delta} \tag{1-71}$$

$\boldsymbol{\delta}$——杆端位移向量。

在有限位移情况下 $\boldsymbol{B}$ 是位移 $\boldsymbol{\delta}$ 的函数矩阵，可分解为与杆端位移无关的部分 $\boldsymbol{B}_0$ 和与杆端位移有关的部分 $\boldsymbol{B_L}$ 两部分，即

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_0 + \boldsymbol{B_L} \tag{1-72}$$

采用增量列式法将式（1-70）写成微分形式

$$\int_V \mathrm{d}(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma})\mathrm{d}V - \mathrm{d}\boldsymbol{f} = 0 \tag{1-73}$$

或：

$$\int_V \mathrm{d}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V + \int_V \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V = \mathrm{d}\boldsymbol{f} \tag{1-74}$$

根据式（1-72），式（1-74）左边第一项可写成：

$$\int_V \mathrm{d}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V = \int_V \mathrm{d}\boldsymbol{B_L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V = {}^{0}\boldsymbol{k}_{\sigma}\mathrm{d}\boldsymbol{\delta} \tag{1-75}$$

当材料满足线弹性时，有

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\varepsilon}-\boldsymbol{\varepsilon}_0)+\boldsymbol{\sigma}_0 \tag{1-76}$$

式中，$\boldsymbol{\varepsilon}_0$——单元的初应变向量；

$\boldsymbol{\sigma}_0$——单元的初应力向量；

$\boldsymbol{D}$——弹性矩阵。

于是，单元的应力、应变增量关系可表示成

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{D}\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1-77}$$

式中，将式（1-71）和式（1-72）代入式（1-77）得

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{D}(\boldsymbol{B}_0+\boldsymbol{B}_L)\mathrm{d}\boldsymbol{\delta} \tag{1-78}$$

于是，式（1-74）左边第二项可表示为

$$\int_V \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V=\left(\int_V \boldsymbol{B}_0{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_0\mathrm{d}V+\int_V \boldsymbol{B}_0{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_L\mathrm{d}V+\int_V \boldsymbol{B}_L{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_0\mathrm{d}V+\int_V \boldsymbol{B}_L{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_L\mathrm{d}V\right)\mathrm{d}\boldsymbol{\delta} \tag{1-79}$$

令：

$${}^0\boldsymbol{k}_0=\int_V \boldsymbol{B}_0{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_0\mathrm{d}V \tag{1-80}$$

$${}^0\boldsymbol{k}_L=\int_V \boldsymbol{B}_0{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_L\mathrm{d}V+\int_V \boldsymbol{B}_L{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_0\mathrm{d}V+\int_V \boldsymbol{B}_L{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B}_L\mathrm{d}V \tag{1-81}$$

则式（1-74）最后可表达为

$$({}^0\boldsymbol{k}_0+{}^0\boldsymbol{k}_L+{}^0\boldsymbol{k}_\sigma)\mathrm{d}\boldsymbol{\delta}={}^0\boldsymbol{k}_T\mathrm{d}\boldsymbol{\delta}=\mathrm{d}\boldsymbol{f} \tag{1-82}$$

式（1-82）就是增量形式 T.L 列式的单元平衡方程。

式中，${}^0\boldsymbol{k}_T$ 是 3 个刚度矩阵之和，称为单元切线刚度矩阵，它表示荷载增量与位移增量之间的关系，也可理解为单元在特定应力、变形下的瞬时刚度；${}^0\boldsymbol{k}_0$ 与单元节点位移无关，是单元弹性刚度矩阵；${}^0\boldsymbol{k}_L$ 称为单元初位移刚度矩阵或单元大位移刚度矩阵，是由大位移引起的结构刚度变化，是 $\mathrm{d}\boldsymbol{\delta}$ 的函数；${}^0\boldsymbol{k}_o$ 称为初应力刚度矩阵，它表示初应力对结构刚度的影响，即当应力为压应力时，单元切线刚度减小，反之单元切线刚度增加。

将各单元切线刚度方程按节点力平衡条件组集成结构增量刚度方程，即有

$${}^0\boldsymbol{K}_T\mathrm{d}\boldsymbol{\varDelta}=\mathrm{d}\boldsymbol{P} \tag{1-83}$$

式中，${}^0\boldsymbol{K}_T$ 为结构切线刚度矩阵，可以由单元切线刚度矩阵按常规方法进行组集形成；$\mathrm{d}\boldsymbol{P}$ 为荷载增量。由于荷载增量一般取为有限值而不可能取成微分形式，结构在求得的位移状态下，抗力与总外荷载之间有一差量，即失衡力，结构必须产生相应位移以改变结构的抗力来消除这个失衡力。在计算中，一般通过迭代法来求解。

在建立 $t+\Delta t$ 时刻物体平衡方程时，如果选择的参照构形不是未变形状态 t=0 时的构形，而是最后一个已知平衡状态，即以本增量步的起始时刻 t 的构形作为参照构形，这种列式法称为更新的拉格朗日列式法（U.L 列式）。

由于采用了 U.L 列式，平衡方程式（1-74）中的积分须在 t 时刻单元体积内进行，且 ${}^t\boldsymbol{k}_L$ 的积分式是 ${}^t\boldsymbol{k}_0$ 的一阶或二阶小量，因此，代表 $\boldsymbol{k}_L$ 的积分式可以略去。这是 U.L 列式与 T.L 列式的一个重要区别。最后增量形式的 U.L 列式平衡方程可写成

$$({}^t\boldsymbol{k}_0+{}^t\boldsymbol{k}_\sigma)\mathrm{d}\boldsymbol{\varDelta}=\mathrm{d}\boldsymbol{P} \tag{1-84}$$

3．材料非线性分析

桥梁结构材料非线性主要是非线性弹塑性问题和混凝土徐变问题，本节介绍非线性弹塑性问题的分析方法，混凝土徐变问题将在第 7 章介绍。

根据实验结果，单轴应力下材料的应力、应变关系可归结为如下几点。

1）应力在达到比例极限前，材料为线弹性；应力在比例极限和弹性极限之间，材料为非线性弹性。

2）应力超过屈服点，材料应变中出现不可恢复的塑性应变，即

$$\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{p} \tag{1-85}$$

应力和应变间为非线性关系，即

$$\sigma = \varphi(\varepsilon) \tag{1-86}$$

3）应力在某一应力 σ_0（$\sigma_0 > \sigma_s$，σ_s 为材料的屈服点）下卸载，则应力增量与应变增量之间存在线性关系，即

$$\mathrm{d}\sigma = E\mathrm{d}\varepsilon \tag{1-87}$$

为了判断是加载还是卸载，用如下加载准则：

- 当 $\sigma\mathrm{d}\sigma \geqslant 0$ 时为加载，满足式（1-86）；
- 当 $\sigma\mathrm{d}\sigma < 0$ 时为卸载，满足式（1-87）。

4）在卸载后某应力 σ 下重新加载，则有

$$\sigma < \sigma_0 \text{时，} \mathrm{d}\sigma = E\mathrm{d}\varepsilon \tag{1-88}$$

σ_0 为卸载前材料曾经受到过的最大应力值，称后屈服应力，即

- 若 $\sigma_0 = \sigma_s$，则材料称为理想塑性的；
- 若 $\sigma_0 > \sigma_s$，则材料称为硬化的。

5）从卸载转入反向力加载，应力、应变关系继续采用式（1-87）或式（1-88），一直到反向屈服。在复杂应力状态下，判断材料是否屈服，可以用应力的某种函数表示，即

$$F(\sigma_{ij}, K) = 0 \tag{1-89}$$

式中，σ_{ij} 为应力状态；K 为硬化函数。

若以 σ_{ij} 为坐标轴建立一坐标空间，则式（1-89）的几何意义为空间超曲面。任一应力状态在此空间中代表一个点，当此点落在屈服面之内时 $F(\sigma_{ij}, K) < 0$，材料呈弹性状态；$F(\sigma_{ij}, K) = 0$ 时，材料开始进入塑性。

常用的屈服条件有：

1）特雷斯卡（Tresca）屈服条件：假定最大剪应力达到某一极限值时，材料开始屈服，相当于材料力学中的第三强度理论。

2）密赛斯（Mises）屈服条件：假定偏应力张量的第二不变量达到某一极限时，材料开始屈服，相当于材料力学中的第四强度理论。

在弹塑性增量理论中，讨论仍限于小变形情况。于是，其应变-位移几何运动方程和平衡方程相同于线性问题，不需要作任何变动。需要改变的只是在塑性区范围内用塑性材料的本构关系矩阵 $\boldsymbol{D}_{ep}$ 代替原来的弹性系数矩阵 $\boldsymbol{D}_{e}$。因此，可直接得到弹塑性分析有限元平衡

方程：

$$ {}^{t}\boldsymbol{K}_T \Delta^t \boldsymbol{u} = \Delta^t \boldsymbol{R} \tag{1-90} $$

式中，

$$ {}^{t}\boldsymbol{K}_T = \sum \int_v \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{ep} \boldsymbol{B} \mathrm{d}v \tag{1-91} $$

$$ \Delta^t \boldsymbol{R} = \Delta^t \boldsymbol{F} + \Delta^t \boldsymbol{T} + \Delta^t \boldsymbol{F}_c - \Delta^t \boldsymbol{F}_I \tag{1-92} $$

其中，$\Delta^t \boldsymbol{F}$ 和 $\Delta^t \boldsymbol{T}$ 分别表示与结构面荷载 f 及体荷载 t 对应的等效节点力增量；$\Delta^t \boldsymbol{F}_c$ 为节点集中外荷载增量；$\Delta^t \boldsymbol{F}_I$ 为初应力或初应变增量引起的外荷载增量，它们在 $t-\Delta t$ 至 t 时间的增量为

$$ \Delta^t \boldsymbol{F} = \sum \int_v \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \Delta^t \boldsymbol{f} \mathrm{d}v \tag{1-93} $$

$$ \Delta^t \boldsymbol{T} = \sum \int_v \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \Delta^t \boldsymbol{t} \mathrm{d}s \tag{1-94} $$

对于初应力问题

$$ \Delta^t \boldsymbol{F}_I = \sum \int_v \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \Delta \boldsymbol{\sigma}_I \mathrm{d}v \tag{1-95} $$

对于初应变问题

$$ \Delta^t \boldsymbol{F}_I = \sum \int_v \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_e \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_I \mathrm{d}v \tag{1-96} $$

式（1-90）～式（1-96）给出了小变形弹塑性分析的有限元方程，式中 ${}^{t}\boldsymbol{K}_T$ 代表了荷载与位移增量的切线刚度，随不同加载历程而变化。求解这一问题的关键是计算单元的切线刚度矩阵和应力，由于本构关系 $\boldsymbol{D}_{ep}$ 是当前应力的函数，即当前位移的隐函数，所以计算时要引入一个材料模型的子程序来处理塑性问题。这个子程序的主要计算内容与步骤如下：

1）由前边迭代的位移结果计算应变增量

$$ \Delta^t \varepsilon = \Delta^t \varepsilon({}^{t}u, {}^{t-\Delta t}u) \tag{1-97} $$

式中，${}^{t}u$ 、${}^{t-\Delta t}u$ 分别为 t 与 $t-\Delta t$ 时刻结构的位移。

2）暂假定 $\Delta\varepsilon$ 是弹性的，计算

$$ \Delta^t \sigma_e = D_e \Delta^t \varepsilon \tag{1-98} $$

3）由此推出新的应力状态为

$$ {}^{t}\sigma = {}^{t-\Delta t}\sigma + \Delta^t \sigma_e = {}^{t-\Delta t}\sigma + D_e \Delta^t \varepsilon \tag{1-99} $$

4）核对在第二步中的假设是否符合事实。将式（1-99）代入加载函数中，计算当前的加载函数值

$$ {}^{t}F = F({}^{t}\sigma, K) \tag{1-100} $$

5）若 ${}^{t}F \leqslant 0$，说明 $\Delta^t \varepsilon$ 确实是弹性的，第二、三步中的计算正确，此子程序的执行可以结束。

6）若 ${}^{t}F > 0$，说明 $\Delta^t \varepsilon$ 中包括了（或甚至全部是）塑性变形，则改变执行以下计算。

7）若本次迭代开始时的应力是弹性的，则本次迭代的应力增量中有一部分是弹性的，

而另一部分是弹塑性的。将弹性部分记为

$$m\Delta^t\sigma_e = mD_e\Delta^t\varepsilon \tag{1-101}$$

显然，$m<1$，将式（1-101）代入到加载函数中，即

$$F({}^{t-\Delta t}\sigma + m\Delta^t\sigma_e, K) = 0 \tag{1-102}$$

即可解出 m

8）计算塑性部分应变增量及当前应力

$$\Delta^t\varepsilon^p = (1-m)\Delta^t\varepsilon \tag{1-103}$$

$${}^t\overline{\sigma} = {}^{t-\Delta t}\sigma + m\Delta^t\sigma \tag{1-104}$$

9）计算应变增量之塑性部分 $\Delta^t\varepsilon^p$ 所引起的应力。由于材料刚度矩阵是非线性的，这一计算应是积分过程。作为数值计算，可改为逐段线性化求和。为此，将 $\Delta^t\varepsilon^p$ 再细分为 M 个小的增量

$$\Delta(\Delta^t\varepsilon^p) = \Delta^t\varepsilon^p / M \tag{1-105}$$

10）在每一个小的子增量 $\Delta(\Delta^t\varepsilon^p)^{(i)}$ 中，先根据子增量起始时的应力计算 $[D_{ep}]^{(i)}$，而

$$\Delta(\Delta^t\sigma) = [D_{ep}]^{(i)}\Delta(\Delta^t\varepsilon^p)^{(i)} \tag{1-106}$$

于是新的应力状态为

$${}^t\sigma^{(i)} = {}^t\sigma^{(i-1)} + \Delta(\Delta^t\sigma)^{(i)} \tag{1-107}$$

由 ${}^t\sigma^{(i)}$ 可计算下一个子增量时的 $\boldsymbol{D}_{ep}{}^{(i+1)}$，并重复以上步骤，结果为

$${}^t\sigma = {}^t\overline{\sigma} + \sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{D}_{ep}{}^{(i)}\Delta(\Delta^t\varepsilon^p)^{(i)} \tag{1-108}$$

由此可形成最终状态的 $\boldsymbol{D}_{ep}$。

以上方法将平衡迭代与本构迭代分开，主步进行平衡迭代，子步进行本构迭代，故称之为子增量法。

4．非线性方程组的求解

结构非线性有限元分析最终归结为一组非线性代数方程的求解。非线性代数方程组的求解方法很多，要根据问题的非线性程度、对计算结果等因素来选择恰当的方法。以下介绍几种常用的求解方法。

（1）直接求解法

直接求解法是基于全量列式的求解过程，应用最多的是直接迭代法，由虚功原理建立的非线性有限元平衡方程为

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\delta})\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{P} \tag{1-109}$$

当设定位移向量 $\boldsymbol{\delta}$ 的初值 $\boldsymbol{\delta}_0$ 后，改进的近似解为

$$\boldsymbol{\delta}_1 = \boldsymbol{K}_0(\boldsymbol{\delta}_0)^{-1}\boldsymbol{P} \tag{1-110}$$

整个迭代过程可表示为

$$\boldsymbol{\delta}_n = \boldsymbol{K}_{n-1}(\boldsymbol{\delta}_{n-1})^{-1}\boldsymbol{P} \tag{1-111}$$

当迭代结果满足预定的收敛准则时，就得到了所要求的节点位移向量。图 1-6a 为取 $\boldsymbol{\delta}_0=0$ 时单自由度问题的迭代过程取得收敛的示意图。

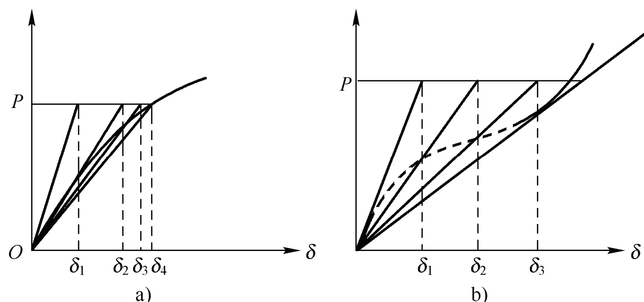


图 1-6 直接迭代法收敛和发散过程

直接迭代法应用简单，运算速度一般也较快，可应用于具有轻微非线性的问题。这一求解过程的成功与否很大程度上取决于对初值位移 $\boldsymbol{\delta}_0$ 的正确估计。图 1-6b 表示的是直接迭代法迭代过程发散时的情形。为改善收敛性和收敛速度，可以对荷载进行分级。

（2）增量法

增量形式的有限元列式方法具有一个共同的特点：将整个荷载变形过程划分为一连串增量段，每一增量段中结构的荷载反应被近似地线性化。简单增量法将每一级增量荷载下直接求得的状态变量视为结构平衡状态，计算相应的切线刚度矩阵，进而进行下一级荷载计算，并不断累加其位移增量。图 1-7 描述了简单增量法的求解过程。

几何非线性问题的有限元分析最初多采用简单增量法进行，虽然这种求解方法对每一级荷载作用时的计算速度较快，但由于每一级荷载作用前结构并未精确地到达平衡位置，所求得的解答会随着增量过程的继续而越来越偏离真实的荷载-变形过程。为了保证计算精度，常常将增量区间划分得相当小。

此外，为了评价解的精度，一般要对同一问题在进一步细分增量区间后再次求解，通过两次解的比较判定是否收敛。这样就需要消耗大量的计算时间。

作为对这一方法的改进，可将不平衡力作为一种修正荷载并入下一级荷载增量。这就是有一阶自校正的增量法。一阶自校正增量法求解过程的示意图如图 1-8 所示。一阶自校正增量法具有较高的求解速度，同时也比简单增量法的计算精度高。这一方法在求解非线性问题特别是求解塑性问题时得到广泛的应用。

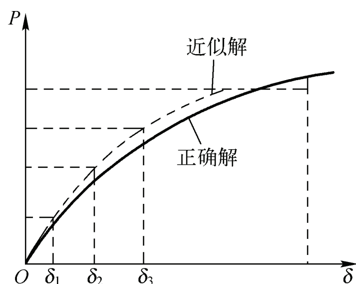


图 1-7 简单增量法的求解过程

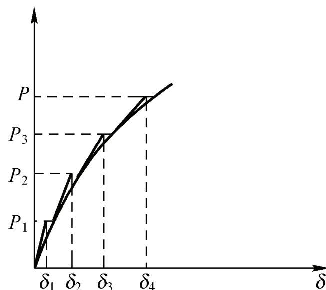


图 1-8 一阶自校正增量法的收敛过程

（3）牛顿-拉夫逊（Newton-Raphson）法

对于多自由度体系，同样导出相应的迭代公式：

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}(\delta_n)_T \boldsymbol{\Delta\delta_{n+1}} = \boldsymbol{R} - F(\delta_n) = \boldsymbol{\Delta R_n} \\ \boldsymbol{\delta_{n+1}} = \boldsymbol{\delta_n} + \boldsymbol{\Delta\delta_{n+1}} \end{cases} \tag{1-112}$$

其中，ΔR_n 为失衡力。式（1-112）即为 Newton-Raphson 法（N·R 法）求解结构非线性问题的基本形式，其收敛过程如图 1-9a 所示。

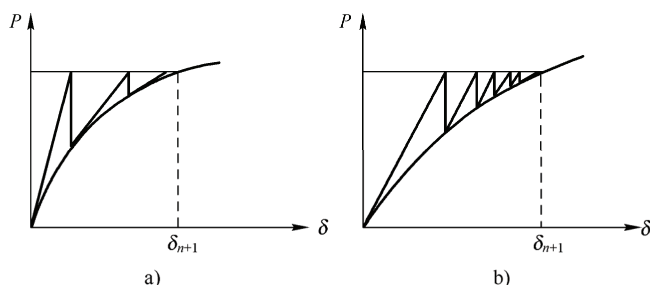


图 1-9　N·R 法的收敛过程

由式（1-112）可见，N·R 法在每次迭代后都要重新形成 $\boldsymbol{K}_T$，对于大跨度桥梁结构进行这一过程很费时。为了减少形成总刚及其三角化分解的次数，有时用 $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\delta}_0)_T$ 代替 $\boldsymbol{K}(\delta_n)_T$，这样，仅进行一次切线刚度矩阵和三角化分解计算，后面的迭代只是线性方程组的回代，这种方法称为修正的N·R法（M·N·R 法）。

图 1-9b 给出了该方法的迭代过程。M·N·R 法在每次迭代中均用同一斜率，收敛较 N·R 差。图 1-10 给出了N·R 法和M·N·R 法求解非线性方程组的流程，编程时可将这两种方法结合使用。

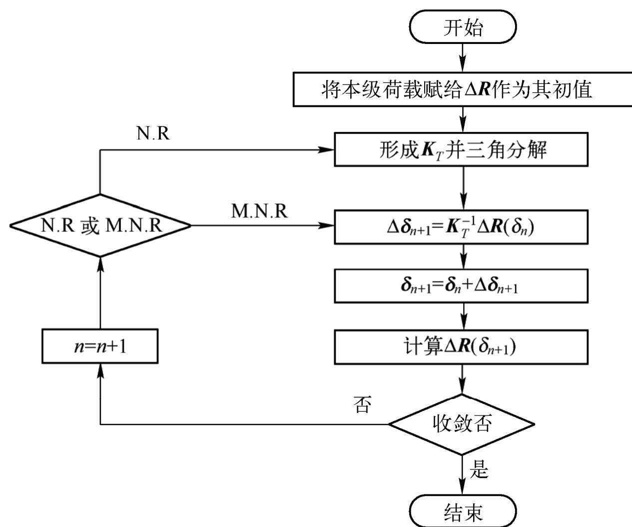


图 1-10　N·R 法和M·N·R 法迭代流程图

（4）收敛准则

在迭代计算中，为了终止迭代过程，必须确定一个收敛标准。在实际应用中，可以从结构的不平衡力向量和位移增量向量两方面来判断迭代计算的敛散性。

数的大小可以用其绝对值来衡量，而对于一个结构，无论其节点力还是节点位移都是向量，其大小一般用该向量的范数来表示。

设列向量 $\boldsymbol{V}$=（$\boldsymbol{v}_1$，$\boldsymbol{v}_2$，$\boldsymbol{v}_3$，…，$\boldsymbol{v}_n$）$^{\mathrm{T}}$，该向量的范数可以定义为：

- 各元素绝对值之和：

$$\|\boldsymbol{V}\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |\boldsymbol{V}_i| \tag{1-113}$$

- 各元素平方和的根

$$\|\boldsymbol{V}\|_2 = (\sum_{i=1}^{n} |\boldsymbol{V}_i^2|)^{1/2} \tag{1-114}$$

- 元素中绝对值最大者

$$\|\boldsymbol{V}\|_\infty = \max_n |\boldsymbol{V}_i| \tag{1-115}$$

这 3 个范数记为$\|\boldsymbol{V}\|_P\ (P=1,2,\infty)$，应用中可任选其中的一种。

有了列向量的范数，无论是节点力向量还是节点位移向量，其“大小”均可按其范数的大小来判断。所谓足够小就是指其范数已小于预先指定的某个小数。

取位移增量为衡量收敛标准的准则称为位移准则，若满足条件

$$\|\Delta u_{i+1}\| \leqslant \alpha_d \|u_i + \Delta u_{i+1}\| \tag{1-116}$$

则认为迭代收敛。式中 α_d ——位移收敛容差；

$\|\Delta u_{i+1}\|$——位移增量向量的某种范数。

实践证明，对有些问题，前后两次迭代所得到的位移向量范数之比值会出现剧烈跳动，以导致收敛不可靠。

取不平衡节点力为衡量收敛标准的准则称为平衡力准则，若满足条件

$$\|\Delta P_i\| \leqslant \alpha_P \|\boldsymbol{P}\| \tag{1-117}$$

则认为迭代收敛。式中，$\boldsymbol{P}$ 为外荷载向量；$\Delta \boldsymbol{P}_i$ 为不平衡力向量；α_p 为不平衡力收敛容差。

上面公式中取哪一种范数，理论上可以任选。有学者认为，在用平衡力准则时，取$\|\Delta \boldsymbol{P}\|_2$ 比较好；在用位移准则时，取$\|\Delta \boldsymbol{u}\|_\infty$ 更为方便。在非线性比较严重的问题中，用位移准则更合适。有的学者还用能量 $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\Delta \boldsymbol{u}$ 作为收敛标准，综合了力与位移两个方面，但要增加更多的计算量。

1.2.4 稳定计算理论

1．概述

稳定是桥梁工程中经常遇到的问题，与强度问题有着同等重要的意义。桥梁跨径的增大、桥塔高耸化、箱梁薄壁化以及高强材料的应用等，使得稳定问题更为突出。

结构失稳是指结构在外力增加到某一量值时，稳定性平衡状态开始丧失，稍有扰动，结

构变形即迅速增大，使结构失去正常工作能力的现象。在桥梁结构中，总是要求其保持稳定平衡，也即沿各个方向都是稳定的。

研究稳定可以从小范围内观察，即在邻近原始状态的微小区域内进行研究。为揭示失稳的真谛，也可从大范围内进行研究。前者以小位移理论为基础，而后者建立在大位移非线性理论的基础上，引出了研究结构稳定问题的两种形式：第一类稳定，分支点失稳问题；第二类稳定，极值点失稳问题。

实际工程中的稳定问题一般都表现为第二类失稳。但是，由于第一类稳定问题是特征值问题，求解方便，在许多情况下两类问题的临界值又相差不大，因此研究第一类稳定问题仍有着重要的工程意义。

桥梁结构的失稳现象表现为结构的整体失稳或局部失稳。局部失稳是指部分结构（子结构）的失稳或个别构件的失稳，局部失稳常常导致整个结构体系的失稳。失稳事故的发生促进了桥梁稳定理论的发展。早在 1744 年，欧拉（L.Eular）就提出了压杆稳定的著名公式。

恩格塞（Engesser）等人根据大量中长压杆在压曲前已超出弹性极限的事实，分别提出了切线模量理论和折算模量理论。普兰特尔和米歇尔几乎同时发表了关于梁侧倾问题的研究成果。

近代桥梁工程中由于采用了薄壁轻型结构，又为稳定问题提出了一系列新的实际课题。瓦格纳（H.Wagner）及符拉索夫（В.З.ВЛаСОВ）等人关于薄壁杆件的弯扭失稳理论，证明其临界荷载值大大低于欧拉理论的临界值，同时又不能用分支点的概念来解释。因而引入了极值点失稳的观点以及跳跃现象的稳定理论。

研究压杆屈曲稳定问题常用的方法有静力平衡法（Eular 方法）、能量法（Timoshenko 方法）、缺陷法和振动法。

- 静力平衡法是从平衡状态来研究压杆屈曲特征的，即研究载荷达到多大时，弹性系统可以发生不同的平衡状态。其实质是求解弹性系统的平衡路径（曲线）的分支点所对应的载荷值（临界载荷）。
- 能量法则是求弹性系统的总势能不再是正定时的载荷值。
- 缺陷法认为，完善而无缺陷的理想中心受压直杆是不存在的。由于缺陷的影响，杆件开始受力时即产生弯曲变形，其值要视缺陷程度而定。在一般条件下缺陷总是很小的，弯曲变形并不显著，只是当荷载接近完善系统的临界值时，变形才迅速增至很大，由此确定其失稳条件。
- 振动法以动力学的观点来研究压杆稳定问题。当压杆在给定的压力下，受到一定的初始扰动之后，必将产生自由振动，如果振动随时间的增加是收敛的，则压杆是稳定的。

以上 4 种方法对于欧拉压杆而言，所得到的临界荷载值是相同的。如果仔细研究一下，可以发现它们的结论并不完全一样，表现在以下几个方面：

1）静力平衡法的结论只能指出，当 P=$P$1、$P$2、…、Pn 时压杆可能发生屈曲现象，至于哪种最可能，并无抉择的条件。同时在 P≠$P$1、$P$2、…、Pn 时，屈曲的变形形式根本不能平衡，因此无法回答直线形式的平衡是不稳定的问题。

2）缺陷法的结论也只能指出，当 P=$P$1、$P$2、…、Pn 时，杆件将发生无限变形，所以是不稳定的。但对于 P 在 $P$1、$P$2、…、Pn 各值之间时压杆是否稳定的问题也不能解释。

3）能量法和振动法都指出，$P>P1$ 之后不论 P 值多大，压杆直线形式的平衡都是不稳定的。这个结论和事实完全一致。

由于桥梁结构的复杂性，不可能单靠上述方法来解决其稳定问题。大量使用的是稳定问题的近似求解方法，归结起来主要有两种类型：一类是从微分方程出发，通过数学上的各种近似方法求解，如逐次渐近法。

另一类是基于能量变分原理的近似法，如 Ritz 法，有限元方法可以看成是 Ritz 法的特殊形式。当今非线性力学将有限元与计算机结合，得以将稳定问题当成非线性力学的特殊问题，用计算机程序实现求解，取得了巨大的成功。

2．第一类稳定有限元分析

根据有限元平衡方程可以表达结构失稳的物理现象。在 T.L 列式下，结构增量形式的平衡方程为

$$({}^{0}\boldsymbol{K}_{0}+{}^{0}\boldsymbol{K}_{\sigma}+{}^{0}\boldsymbol{K}_{L})\Delta\boldsymbol{u}={}^{0}\boldsymbol{K}_{T}\Delta\boldsymbol{u}=\Delta\boldsymbol{R} \tag{1-118}$$

U.L 列式下，结构的平衡方程为：

$$({}^{t}\boldsymbol{K}_{0}+{}^{t}\boldsymbol{K}_{\sigma})\Delta\boldsymbol{u}={}^{t}\boldsymbol{K}_{T}\Delta\boldsymbol{u}=\Delta\boldsymbol{R} \tag{1-119}$$

发生第一类失稳前，结构处于初始构形线性平衡状态，因此，式（1-118）中大位移矩阵 ${}^{0}\boldsymbol{K}_{L}$ 为零。在 U.L 列式中不再考虑每个载荷增量步引起的构形变化，所以，不论 T.L 还是 U.L 列式，结构的平衡方程的表达形式是统一的。即：

$$(\boldsymbol{K}+\boldsymbol{K}_{\sigma})\Delta\boldsymbol{u}=\Delta\boldsymbol{R} \tag{1-120}$$

在结构处在临界状态下，即使$\{\Delta\boldsymbol{R}\}\to 0$，$\{\Delta\boldsymbol{u}\}$也有非零解，按线性代数理论，必有：

$$\left|\boldsymbol{K}+\boldsymbol{K}_{\sigma}\right|=0 \tag{1-121}$$

在小变形情况下，$\boldsymbol{K}_{\sigma}$ 与应力水平成正比。由于假定发生第一类失稳前结构是线性的，多数情况下应力与外荷载也为线性关系，因此，若某种参考荷载 $\overline{\boldsymbol{P}}$ 对应的结构几何刚度矩阵为 $\overline{\boldsymbol{K}}_{\sigma}$，临界荷载为 $\boldsymbol{P}_{cr}=\lambda\overline{\boldsymbol{P}}$，那么在临界荷载作用下结构的几何刚度矩阵为

$$\boldsymbol{K}_{\sigma}=\lambda\overline{\boldsymbol{K}}_{\sigma} \tag{1-122}$$

于是式（1-121）可写成

$$\left|\boldsymbol{K}+\lambda\overline{\boldsymbol{K}}_{\sigma}\right|=0 \tag{1-123}$$

式（1-123）就是第一类线弹性稳定问题的控制方程。稳定问题转化为求方程的最小特征值问题。

一般来说，结构的稳定是相对于某种特定荷载而言的。在桥梁结构中，结构内力一般由施工过程确定的恒载内力（这部分必须按施工过程逐阶段计算）和后期荷载（如二期恒载、活载、风载等）引起的内力两部分组成。因此 $\boldsymbol{K}_{\sigma}$ 也可以分成一期恒载的几何刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_{1\sigma}$ 和后期荷载的几何刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_{2\sigma}$ 两部分。

当计算的是一期恒载稳定问题时，$\boldsymbol{K}_{2\sigma}=0$，$\boldsymbol{K}_{\sigma}$ 可直接用恒载来计算，这样通过式（1-123）算出的λ就是一期恒载的稳定安全系数；当计算的是后期荷载的稳定问题时，恒载$[K_{1}]_{\sigma}$ 可近似为一常量，式（1-123）改写成：

$$\left| \boldsymbol{K} + \boldsymbol{K}_{1\sigma} + \lambda \boldsymbol{K}_{2\sigma} \right| = 0 \tag{1-124}$$

形成和求解式（1-124）的步骤可简单归结为：

1）按施工过程，计算结构恒载内力和恒载几何刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_{1\sigma}$。

2）用后期荷载对结构进行静力分析，求出结构初应力（内力）。

3）形成结构几何刚度矩阵 $\boldsymbol{K}_{2\sigma}$ 和式（1-124）。

4）计算式（1-124）的最小特征值问题。

这样，求得的最小特征值 λ 就是后期荷载的安全系数，相应的特征向量就是失稳模态。

3．第二类稳定有限元分析

第二类稳定是指桥梁结构在不断增加的外载作用下，结构刚度不断变化，当外载产生的应力使结构切线刚度矩阵趋于奇异时，结构承载能力就达到了极限，稳定性平衡状态开始丧失，稍有扰动，结构变形即迅速增大，使结构失去正常工作能力的现象。

从力学分析角度看，分析桥梁结构第二类稳定性，就是通过不断求解计入几何非线性和材料非线性的结构平衡方程，寻找结构极限荷载的过程。

全过程分析法是用于桥梁结构极限承载力分析的一种计算方法，它通过逐级增加工作荷载集度来考察结构的变形和受力特征，一直计算至结构发生破坏。

1.3 工程问题中的有限元理论

本节将向读者介绍有限分析的基本原理。在本节中，将把诸多工程上常见的问题简化成等价的一维形式的控制方程，并同时介绍相应于上述一维控制方程、而且仅仅适用于一维问题的有限元方法。总而言之，这一节将针对某些实例对有限元分析的基本内容和主要方法加以阐述。

采用有限元方法可以给出相应的微分方程边值问题的近似数直解。本节将通过求解微分方程的变分形式，给出微分方程的解，由于物理问题的边界条件是由变分形式自然给出的，因此上述问题的变分形式常常包含了某些边界条件。为了便于阐述基本概念，所论述的变分函数将不考虑边界条件，典型微分方程的边界条件由相应的物理条件给出。

1.3.1 工程问题的数学物理方程

工程问题的控制方程通常由其基本方程和平衡方程给出，本节将具体介绍诸多不同物理问题的一维控制方程，控制方程在基本形式上是大体一致的，并采用与相关工程领域中的用法相一致的数学符号。

从变分原理出发，可以给出相应的物理问题的有限元模型，对于质量、张力、长度、时间、温度及能量等物理量，其单位物理量分别用 M、F、L、t、T 和 E 来表示。

（1）一维弹性问题

在法向应力和轴向外力的作用下，直杆上力的平衡问题可以表示为一维微分方程问题，设坐标 x 处的应力分布为 $\sigma(x)$，截面积为 $A(x)$，轴向外力为 $f(x)$。则直杆在该处的应力为 $\sigma(x)A(x)$，考虑到外力对直杆的作用，可以得到如下的基本方程：

$$\frac{\mathrm{d}[\sigma(x)A(x)]}{\mathrm{d}x}+f(x)A(x)=0 \tag{1-125}$$

由胡克定律（Hooke）可知，应力和截面 x 处的伸长率（即应变）ε 之间的关系由构成直杆材料的弹性系数 $\varepsilon(x)$ 给出。利用弹性模量（杨氏模量）定律，应力与轴向位移 $u(x)$ 之间的关系满足

$$\sigma(x)=E(x)\varepsilon(x) \text{ 和 } \varepsilon(x)=\frac{\mathrm{d}u(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-126}$$

或者

$$\sigma(x)=E(x)\frac{\mathrm{d}u(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-127}$$

联合式（1-126）和式（1-127）可以得到关于位移 $u(x)$ 的二阶微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[E(x)A(x)\frac{\mathrm{d}u(x)}{\mathrm{d}x}]+f(x)A(x)=0 \tag{1-128}$$

上述方程有两类不同形式的边界条件：一类为自然边界条件；另一类为几何边界条件或者称为本质边界条件。其中关于 $u(x)$ 的边界条件为本质边界条件；关于 $\sigma(x)$ 的边界条件为自然边界条件。

相关物理量的单位：$\sigma(x)$ 为 F/L^2，$A(x)$ 为 L^2，$f(x)$ 为 F/L^3，ε 为 L/L，$E(x)$ 为 F/L^2，$u(x)$ 为 L。

将力的守恒方程与定义悬索的斜率的基本几何方程相结合，可以将发生微小弯曲后悬索的平衡问题视为弹性问题。利用小扰动原理，假设悬索的张力 F 为常量，则作用在悬索上的合力满足方程：

$$F\frac{\mathrm{d}\theta(x)}{\mathrm{d}x}-k(x)\upsilon(x)=-f(x) \tag{1-129}$$

这里 $\theta(x)$ 为悬索的斜率，$\upsilon(x)$ 为悬索在垂直方向上的扰动量，$k(x)$ 为悬索的弹性模量，$f(x)$ 为作用在悬索上的沿着垂直方向的载荷。利用小扰动原理，知道 θ 为一个小量。从而可以导出悬索的基本几何方程，即 θ 可以近似的表示为：

$$\theta=\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}x} \tag{1-130}$$

由式（1-129）可以得出，张力沿着垂直方向分量为：

$$F_y=T\frac{\mathrm{d}\upsilon}{\mathrm{d}x} \tag{1-131}$$

联合式（1-129）和式（1-130）可以得到如下的控制方程：

$$F\frac{\mathrm{d}^2\upsilon(x)}{\mathrm{d}x^2}-k(x)\upsilon(x)=-f(x) \tag{1-132}$$

这里关于 $\upsilon(x)$ 的边界条件为本质边界条件；而由式（1-131）给出的关于 F_y 的边界条件为自然边界条件。值得注意的是上述边界条件应与给定的斜率 θ 等价。

（2）热传导问题

从能量守恒方程和基本方程可以推出描述一维定常热传导问题的基本方程。能量守恒原理要求热通量 $q(x)$ 的变化与外部的热源 $Q(x)$ 相等，即

$$\frac{\mathrm{d}[q(x)A(x)]}{\mathrm{d}x}=Q(x)A(x) \tag{1-133}$$

这里 $A(x)$ 为传热面积，$Q(x)$ 的相反数表示系统传出去的热量，其基本方程（也称为傅里叶定律）为

$$q(x)=-k(x)\frac{\mathrm{d}T(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-134}$$

这里 $T(x)$ 表示温度，$k(x)$ 代表热传导系数。联合式（1-133）和式（1-134）得到如下的二阶控制微分方程

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[k(x)A(x)\frac{\mathrm{d}T(x)}{\mathrm{d}x}]+Q(x)A(x)=0 \tag{1-135}$$

这里关于 $T(x)$ 的边界条件为本质边界条件，而关于 $q(x)$ 的边界条件为自然边界条件。

（3）位势流

作为流体力学领域中的一个特殊方面，位势流广泛应用于地下水流动问题，在上述应用中，可以假设流体为定常不可压缩流动，从而可以完全由连续方程或者质量守恒方程描述上述问题。假设面积为一定常数，则一元势函数可以假设为

$$\phi(x)=-K(x)h(x)=-K(x)\left(\frac{z+p}{\gamma}\right) \tag{1-136}$$

以及

$$u(x)=\frac{\phi(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-137}$$

其中，$u(x)$ 为流动速度；$h(x)$ 为压力头；$z(x)$ 为高度头；γ 为地下水问题中水的比重；p 为压力；$K(x)$ 为渗透率或者水力学传导系数。其基本方程有达西定律（Darcy）给出：

$$u(x)=-K\frac{\mathrm{d}h(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-138}$$

式（1-138）表明达西定律与由式（1-136）给出的位势流的定义是相关的。注意到一维定常不可压缩流动满足 $\mathrm{d}u/\mathrm{d}x=0$，并联合式（1-136）～式（1-138）有：

$$\frac{\mathrm{d}\phi^2}{\mathrm{d}^2x}=0 \tag{1-139}$$

式（1-139）的解为线性函数，因而一维流动问题的速度为一常数。然而，与之相对应的二维问题式（1-139）的解却比较复杂。上述问题中关于 $\phi(x)$ 的边界条件为本质边界条件；而关于速度的边界条件为自然边界条件。

（4）质量输运方程

对于大多数的基本位势流问题，如果其流动是定常的、且控制方程与式（1-139）相

似，则将发生扩散现象。在此类问题中，质量方程的平衡将以稀释混合项的形式写出。上述理论广泛应用于物理问题之中。

特别地，当把地下水流动问题视为位势流问题时，可以假设有某种物质与地下水构成混合共同流动，并同时在混合物中进行扩散。

因而可以将位势流理论与质量扩散理论相结合，得到主要物理问题的一个较为全面的描述。假设截面积为一定常数，则稀释混合项的质量可以表示为

$$u(x)\frac{\mathrm{d}C(x)}{\mathrm{d}x}+\frac{\mathrm{d}j(x)}{\mathrm{d}x}+K_rC(x)=m \tag{1-140}$$

式中，$u(x)$ 表示混合物的流动速度；$C(x)$、$j(x)$ 分别表示稀释项的浓缩系数和流通量；K_r 表示稀释项与其周围物质之间的反应速度，例如，化学反应；m 为外部的质量源函数。其基本方程称为 Fick 定律，可以表示为

$$j(x)=-D(x)\frac{\mathrm{d}C(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-141}$$

式中，$D(x)$ 为扩散系数，联合式（1-140）和式（1-141）可以得到控制方程为

$$u(x)\frac{\mathrm{d}C(x)}{\mathrm{d}x}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[D(x)\frac{\mathrm{d}C(x)}{\mathrm{d}x}]+K_rC(x)=m \tag{1-142}$$

这里假设速度 $u(x)$ 是已知的。其中关于 $C(x)$ 的边界条件为本质边界条件；而关于流通量 $j(x)$ 的边界条件为自然边界条件。

（5）电流

静电控制方程与热传导方程是相似的。下面的电荷平衡方程给出了电量分布 $D(x)$ 与电荷密度 $\rho(x)$ 之间的关系为

$$\frac{\mathrm{d}[A(x)D(x)]}{\mathrm{d}x}=\rho(x)A(x) \tag{1-143}$$

这里 $A(x)$ 为垂直于 x 轴的横截面面积，电场 $E(x)$ 与电势 $\phi(x)$ 之间的关系满足

$$E(x)=-\frac{\mathrm{d}\phi(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-144}$$

相应的基本方程为

$$D(x)=\varepsilon(x)E(x)=-\varepsilon(x)\frac{\mathrm{d}\phi(x)}{\mathrm{d}x} \tag{1-145}$$

这里 $\varepsilon(x)$ 表示材料的电容。联合式（1-143）和式（1-145）得到的控制方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[\varepsilon(x)A(x)\frac{\mathrm{d}\phi(x)}{\mathrm{d}x}]+\rho(x)A(x)=0 \tag{1-146}$$

式中，关于 $\phi(x)$ 的边界条件为本质边界条件；关于 $D(x)$ 的边界条件为自然边界条件。

1.3.2 变分函数

变分的计算是求泛函极值问题的一种数学方法。作为一种积分形式，如果将某一函数带入一个泛函中，则该泛函具有一个确定的数值。变分计算的主要问题是求函数 $f(x)$，使得

函数的小变差 $\delta f(x)$ 不至于改变原来的泛函。

研究变差的计算并将其应用于有限元理论之中，将涉及线性代数、泛函分析和拓扑学原理等相关知识。

本节将介绍变分计算的最基本理论，并由此介绍如何将泛函变分用于构造有限元模型，上面的各个方程的变分函数的用法，与应变能量和最小势能原理在弹性理论和结构理论中的用法是相似的。

除了含有一阶导数项的方程以外，上节中其他控制方程的变分函数可以写成统一的形式。本书的后续内容中，由于有限单元上的面积和材料弹性系数等项被视为常数，所以上述方程中的相应项也将视为常数。记为 $f = f(x)$，有

$$J_1(f) = \int_V \frac{1}{2}\left[\alpha\left(\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}x}\right)^2 + \beta f^2 - 2\gamma f\right]\mathrm{d}V \tag{1-147}$$

含有一阶导数项的方程则不一定有相应的变分函数。然而，为了得到上述方程的有限元模型，可以采用伪变分函数或者拟变分函数来表示相应的控制微分方程。如果记式（1-140）中的 $C = C(x)$，则与其相应的拟变分函数为

$$J_2(C) = \int_V \frac{1}{2}\left[D\left(\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}x}\right)^2 + Cu\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}x} + K_r C^2 - 2mC\right]\mathrm{d}V \tag{1-148}$$

对于本节所论述的控制微分方程，式（1-147）经过适当的变形即可得到相应方程的特征变分函数；而采用类似的分析过程却不能够由式（1-148）经过适当变形导出式（1-140）的特征变分函数。不过，可以由式（1-148）导出式（1-140）的有限元模型。

一般情况下，变分格式中包含有边界条件。因而从这一角度讲，式（1-147）的表示并不完善。然而，变分函数给出了函数与微分方程之间的对应关系，并成为初步研究有限元方法的必要条件。

1.3.3 插值函数

有限元方法的最基本概念是指连续函数可以近似表示为离散模型。这里的离散模型是由一个或多个插值多项式组成的，而连续函数被分成有限段（或有限片、有限块），亦即有限个单元，每个单元由一个插值函数所定义，用以刻画单元在端点之间的状态。有限单元的端点称为节点。

1.3.4 形函数

形函数（某些书中也称为形状函数）常用字母 N 来表示，它通常为插值多项式的系数。在某个有限单元中，不同的节点有其各自的形函数，它在该点的函数值为 1，而在该单元上其他节点处的函数值为 0。插值多项式和形函数这两个概念经常交替使用。

1.3.5 刚度矩阵

刚度矩阵这个名词来源于结构分析，有限元方法的最早期应用类似于矩阵的结构分析，用以描述力和位移之间的矩阵关系。现在，在提到刚度矩阵时，不再考虑其应用。温度与热

通量之间的矩阵关系亦称为刚度矩阵。

有限元方法定义了两个刚度矩阵：单元刚度矩阵对应于独立的某一个单元；整体刚度矩阵由所有单元刚度矩阵组装而成，定义的是整个系统的刚度矩阵。

1.3.6 连通性

连通性是指有限元模型汇总的一个单元与相邻单元的连接。本章所论述内容中，对于每个节点处有一个未知量的一维线性两节点单元而言，局部单元上的微分运算是主要的。上述单元的左端点的编号为 1，右端点的编号为 2。显然，整体有限元模型中的所有点不能都记为点 1 或点 2。整个模型和局部模型之间通过连通度矩阵进行联系。如果整体模型中含有 N_{e1} 个有限单元，每个单元中含有 N_{node} 个节点，则连通度矩阵的维数为 $N_{e1}\times N_{node}$ 。如图 1-11 所示，整个模型中含有 5 个用罗马字母表示的单元，而局部模型和整体模型之间通过表 1-3 所示的 5×2 阶连通度矩阵进行联系。

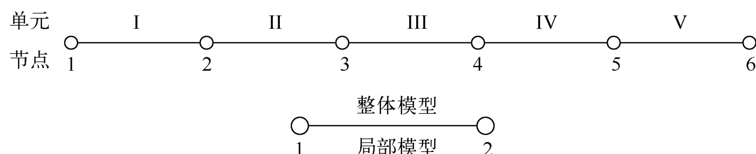


图 1-11　整体及局部有限元模型

表 1-3　连通性矩阵

整 体 单 元	局 部 单 元	
	节点 1	节点 2
I	1	2
II	2	3
III	3	4
IV	4	5
V	5	6

1.3.7 边界条件

在上节中，边界条件分为本质边界条件和自然边界条件两种，采用解析法可以得到的类似于本章中所介绍的二阶方程的解，只不过这里需要计算两个积分常数。为计算上述积分值，必须给出两个边界条件，这些边界条件通常在问题的一维定义域的两端分别给出。边界条件一般按照未知量的具体数学形式进行分类。

在数学术语中，本质边界条件也称为狄里克雷（Dirichlet）边界条件。由式（1-134），长度为 L 的等截面均匀直杆的一维定常状态的热传导问题，可以表示为如下的狄里克雷问题

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}+Q=0 \tag{1-149}$$

$$T(0)=T_0 \text{ 和 } T(L)=T_L \tag{1-150}$$

这里的两个边界条件都是针对于温度给定的。这类边界条件的应用参见本章的**实例 1**。

实际问题的诺依曼（Neumann）边界条件在两个边界点上都是给出一阶导数值，这类问题称为诺依曼问题。对于热传导问题，其诺依曼边界条件是给出通量所满足的条件，例如联合式（1-149）和式（1-150）所得

$$k_0\frac{\mathrm{d}T(0)}{\mathrm{d}x}=q_0 \text{ 和 } k_0\frac{\mathrm{d}T(L)}{\mathrm{d}x}=q_L \tag{1-151}$$

这类边界条件给理论求解和数值求解都带来了不少困难，只有在给定某一温度的条件下，上述问题才是唯一可解的。本章将不讨论类似于式（1-151）的边界条件的有限元分析。

第三类边界条件称为混合边界条件。这类边界条件相当于式（1-150）和式（1-151）的组合形式，是最常用的一类边界条件。实际上有两种混合边界条件：一种情况是一个边界条件为本质边界条件，而另一个边界条件为自然边界条件。本章的**实例 2** 就是这类混合边界条件的一个实例；第二类混合边界条件，如热传导方程的边界条件为

$$k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}+h(T-T^{\infty})=0 \tag{1-152}$$

这里 h 为对流换热系数，T^{∞} 为边界面以外介质的温度。上述边界条件表明边界通量与边界温度结合等于某一已知温度，第二类边界条件可以为本质边界条件和自然边界条件，也可以为类似于式（1-152）的形式。

1.3.8 圆柱坐标系中的问题

诸如热传导和静电分布等一维轴对称微分方程与式（1-134）和式（1-146）是相似的，与式（1-146）相对应的轴对称柱面坐标系下的电势方程为

$$\varepsilon\frac{\mathrm{d}^2\phi}{\mathrm{d}r^2}+\frac{\varepsilon}{r}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}r}+\rho=0 \tag{1-153}$$

由于此处的定义域对应于柱面边界的轴线，故面积为常数。式（1-153）可以简写为

$$\frac{\varepsilon}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}r}\right)+\rho=0 \tag{1-154}$$

与之相对应的变分函数为

$$J(\phi)=\int_{r1}^{r2}\left[\pi r\varepsilon\left(\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}r}\right)^2-2\pi r\rho\phi\right]\mathrm{d}r \tag{1-155}$$

这里 $2\pi r\mathrm{d}r$ 代替了 $\mathrm{d}V$。

1.3.9 直接方法

直接方法通常用来叙述从矩阵结构分析到有限元常用概念的发展过程。其主要目的就是利用从材料力学导出的直杆或者梁单元问题的解法。例如，材料力学中，在定常外力 P 的作用下，直杆上的轴向应力为 $\sigma=P/A$，将以上定义与式（1-155）相结合，可以推导出直杆

在沿着轴向外力作用下的变形

$$u = \frac{PL}{AE} \tag{1-156}$$



式中，当u是直杆的两端沿着轴向收到的均匀外力P的作用时，长度为L的直杆的整体变形，由式（1-156）可以给出刚度矩阵。基于式（1-156）的推导过程一般包括在桁架的应力分析之中，这里每一个桁架可以被视为一个单元；外力P通常为桁架节点处的载荷。

1.4 桁架与梁的有限元方法

上一节简单介绍了工程问题一般的数学物理方程与有限元分析的初步建立方法，从这节开始介绍有限元分析方法在桁架、梁等方面中的使用。

1.4.1 桁架的定义

桁架是一种工程结构，它由直杆组成，这些杆件在端点处通过螺栓、铆钉、销钉或焊接连接在一起。桁架中的杆件可以由钢管、铝管、木杆、角钢和槽钢等组成。桁架能够用来解决电力传输塔、桥梁和建筑物的屋顶等许多结构问题。

平面桁架指的是所有杆件均在同一平面内，且施加在这种桁架上的力也必须在同一平面。桁架的杆件通常被认为是二力杆。这意味着沿着杆方向的内力大小相等、方向相反，如图 1-12 所示。

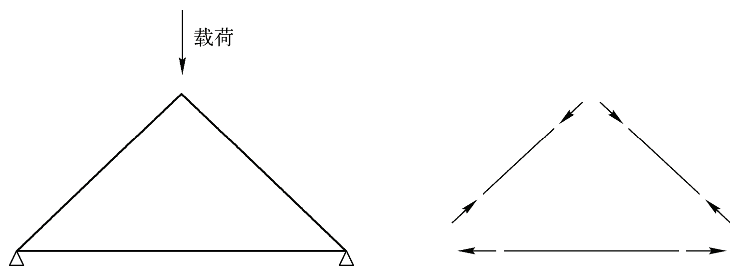


图 1-12 承受载荷的简单桁架

下面的分析都是假设三维桁架中各杆件均由光滑的销钉和球形节点连接在一起，而且只要连接构件的中心线相交于一点，通过螺栓或焊接而连接的节点都可以看成光滑的销钉（没有弯曲）。

另一个假设和载荷的施加方式有关。所有的载荷都施加到一个节点上。这个假设在大多数情况下是成立的，因为桁架在设计时就考虑让大部分载荷施加在节点上。

一般情况下，杆的重量与施加的载荷相比可以忽略不计。然而，如果需要考虑杆的重量，那么将每根杆一半的重量施加在一侧的节点上。

许多基本的力学教材都讨论了静定桁架的问题。这类问题通常利用节点法或截面法进行分析。因为桁架杆被看作刚体，因此这些方法不能提供节点变形的信息，也因为桁架的杆件被假设为刚体，不可能分析超静定问题。

有限元方法允许用户在除去刚体这一限制的情况下解决这类问题。图 1-13 描述了静定问题和超静定问题。

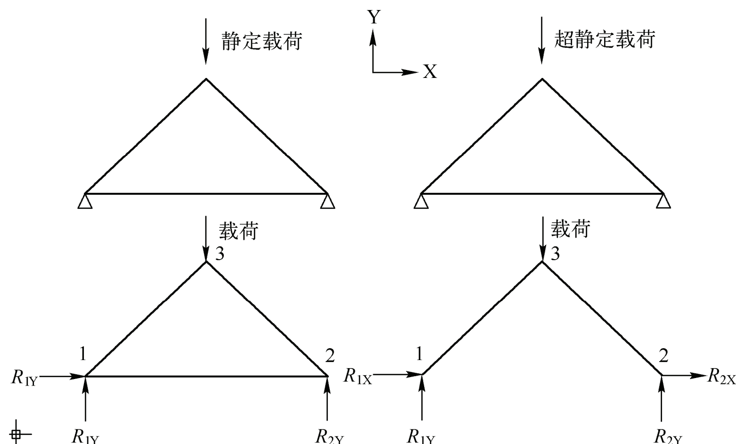


图 1-13　静定问题和超静定问题

从图 1-13 中看以看出，静定问题中有 3 个支座力、3 个平衡方程，即：

$$\sum F_X = 0, \sum F_Y = 0, \sum M = 0$$

而超静定问题中有 4 个支座力、3 个平衡方程，即：

$$\sum F_X = 0, \sum F_Y = 0, \sum M = 0$$

1.4.2 桁架的有限元公式

考虑承受力 F 作用的单个杆件的变形，如图 1-14 所示。任何二力杆的平均应力由下式给出：

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1-157}$$

杆的平均应变可由下式表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{1-158}$$

在弹性阶段，应力和应变服从胡克定律：

$$\sigma = \varepsilon E \tag{1-159}$$

结合式（1-157）～式（1-159）有：

$$F = \left(\frac{AE}{L}\right)\Delta L \tag{1-160}$$

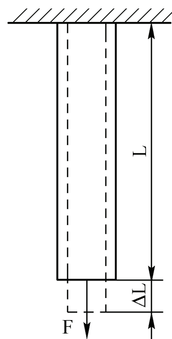


图 1-14　承受力 F 作用的二力杆

注意：式（1-160）和线性弹簧的方程 $F = kx$ 很相似。因此，等截面的轴心受力杆件在建模时可以有类似弹簧的刚度：

$$k_{eq} = \frac{AE}{L} \tag{1-161}$$

图 1-15 所示是一个仅有 5 个节点和 6 个单元的桁架。对这个桁架，需要将任意方向上的杆件离散化，现选择单元 5 进行分析。

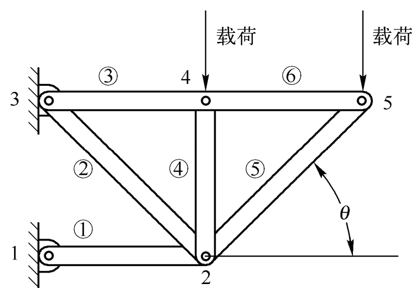


图 1-15 桁架

一般来说，对桁架问题需要两个坐标系来描述，即整体坐标系和局部坐标系。选择固定的整体坐标系统 XY，1）描述了每个节点的位置，使用角度标记 θ 记录每个（单元）的方向；2）施加约束及载荷；3）表示问题的解，即在整体方向上的每个节点的位移。同时，还需要一个局部的单元坐标系来描述各个杆件（单元）的受力情况。图 1-16 给出了局部坐标系与整体坐标系之间的关系。

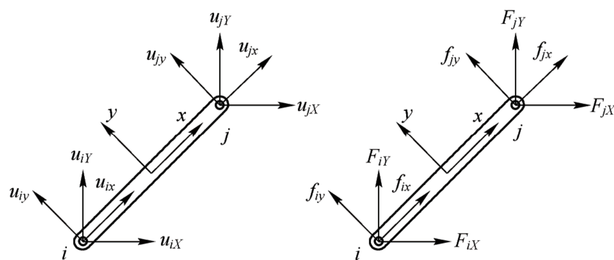


图 1-16 整体坐标与局部坐标的关系

以下描述了整体位移（在节点 i 的 U_{iX}，U_{iY} 和在节点 j 的 U_{jX} 和 U_{jY}）和局部位移（在节点 i 的 U_{iX}，U_{iY} 和在节点 j 的 U_{jX} 和 U_{jY}）之间的关系：

$$\begin{aligned} U_{iX} &= u_{ix}\cos\theta - u_{iy}\sin\theta \\ U_{iY} &= u_{ix}\sin\theta + u_{iy}\cos\theta \\ U_{jX} &= u_{jx}\cos\theta - u_{jy}\sin\theta \\ U_{jY} &= u_{jx}\sin\theta + u_{jy}\cos\theta \end{aligned} \tag{1-162}$$

若将式（1-162）写成矩阵形式，有：

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{u}$$

其中

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix}U_{iX}\\U_{iY}\\U_{jX}\\U_{iY}\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta\\ 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{u}=\begin{pmatrix}u_{ix}\\u_{iy}\\u_{jx}\\u_{jy}\end{pmatrix} \tag{1-163}$$

$\boldsymbol{U}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 分别代表整体坐标系 XY 和局部坐标系 xy 下节点 i 和节点 j 的位移。$\boldsymbol{T}$ 是从局部变化转化到整体形变的变换矩阵。类似地，局部力和整体力的关系为

$$\begin{aligned}F_{iX}&=f_{ix}\cos\theta-f_{iy}\sin\theta\\F_{iY}&=f_{ix}\sin\theta+f_{iy}\cos\theta\\F_{jX}&=f_{jx}\cos\theta-f_{jy}\sin\theta\\F_{iY}&=f_{jx}\sin\theta+f_{jy}\cos\theta\end{aligned} \tag{1-164}$$

或者写成矩阵的形式为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{Tf} \tag{1-165}$$

其中：

$$\boldsymbol{F}=\begin{pmatrix}F_{iX}\\F_{iY}\\F_{jX}\\F_{iY}\end{pmatrix}$$

是整体坐标系下施加在节点 i 和节点 j 上的力的分量，且：

$$\boldsymbol{f}=\begin{pmatrix}f_{ix}\\f_{iy}\\f_{jx}\\f_{jy}\end{pmatrix}$$

代表局部坐标系下施加在节点 i 和节点 j 上的力的分量。

以上步骤推导出了单元在局部坐标系和整体坐标系间的关系。然而，需要注意，在局部坐标系下 y 方向上的位移和合力为零。原因很简单，在假设的二力杆条件下，杆只能沿轴向（局部坐标系下 x 方向）伸长或者压缩，这也说明，内力总是沿着 x 轴方向的，如图 1-17 所示。

我们不将这些值设为零，以便于保持对矩阵的一般性描述，这将更加容易地推导单元刚度矩阵。当将 y 方向的位移以及力设置为零时，将使方程变得非常清楚。局部坐标系下内力和位移通过刚度矩阵的关系：

$$\begin{pmatrix}f_{ix}\\f_{iy}\\f_{jx}\\f_{jy}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}k & 0 & -k & 0\\0 & 0 & 0 & 0\\-k & 0 & k & 0\\0 & 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u_{ix}\\u_{iy}\\u_{jx}\\u_{jy}\end{pmatrix} \tag{1-166}$$

式中，$k = k_{eq} = \dfrac{AE}{L}$，若写成矩阵形式，有：

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} \tag{1-167}$$

将 $\boldsymbol{f}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 替换成 $\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{U}$，有：

$$\overbrace{\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{F}}^{f} = \boldsymbol{K}\overbrace{\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{U}}^{u} \tag{1-168}$$

式中，$\boldsymbol{T}^{-1}$ 是变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的逆矩阵，为

$$\boldsymbol{T}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \tag{1-169}$$

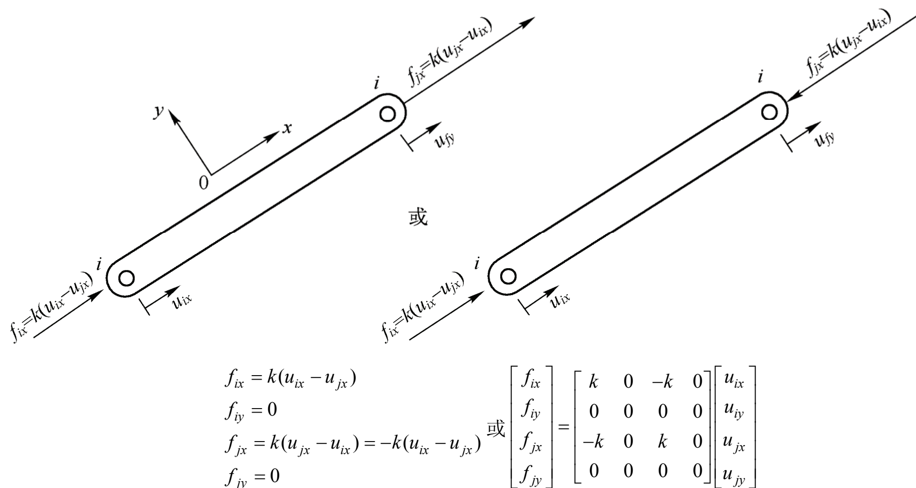


图 1-17　桁架内力图

式（1-168）两边都乘以 $\boldsymbol{T}$，则得到：

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{K}\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{U} \tag{1-170}$$

替换式（1-170）中的 $\boldsymbol{T}$，$\boldsymbol{K}$，$\boldsymbol{T}^{-1}$ 和 $\boldsymbol{U}$ 矩阵的值，相乘后得到：

$$\begin{pmatrix} F_{iX} \\ F_{iY} \\ F_{jX} \\ F_{iY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta & -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta \\ -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{iX} \\ U_{iY} \\ U_{jX} \\ U_{jY} \end{pmatrix} \tag{1-171}$$

式（1-171）表示了施加的外力、单元刚度矩阵 $\boldsymbol{K}^{(e)}$ 和任意单元节点的整体位移之间的关系。桁架的任意杆（单元）的刚度矩阵 $\boldsymbol{K}^{(e)}$ 为：



$$
\boldsymbol{K}^{(e)} = k\begin{pmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta & -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta \\ -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{pmatrix} \tag{1-172}
$$

剩下的步骤就是组合单元的刚度矩阵、应用边界条件和载荷条件、求解位移得到平均应力等其他相关信息。

1.4.3 梁的定义

梁在工程上有着极其重要的应用，如房屋建筑、桥梁工程、汽车和飞机主体结构等。梁作为一种结构件，它的截面积尺寸要比它的长度方向小很多。梁通常要承受横向载荷的作用，这种载荷会引起弯曲。承受均布载荷作用的梁如图 1-18 所示。

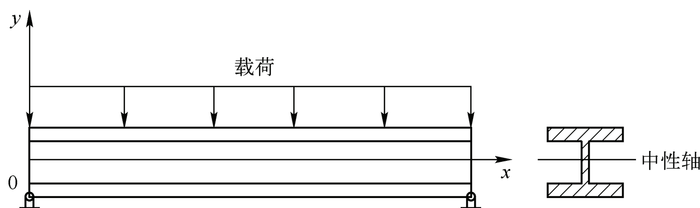


图 1-18　均布载荷作用下的梁

上一节将桁架定义为由二力杆组成的结构，而且应用桁架模型分析问题时，假定所有的载荷都作用在桁架的节点上，因而构件没有弯曲发生。但是对于梁这类结构来说，载荷可以作用在沿着梁方向的任意一个位置上，载荷会在梁中产生弯曲变形。因此，在建立物理模型时，严格区分不同性质的构件很重要。

设梁任意位置 x 处中性轴的挠度用 υ 表示。在小应变状态下，截面正应力 σ，弯矩 M 和惯性矩 I 之间的关系可用下式描述：

$$
\sigma = -\frac{My}{I} \tag{1-173}
$$

式中，y 是横截面上任意一点到中性轴的距离。中性轴的挠度 υ 与弯矩 $M(x)$、剪应力 $V(x)$ 和载荷 $w(x)$ 的关系式为

$$
EI\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2} = M(x) \tag{1-174}
$$

$$
EI\frac{\mathrm{d}^3 v}{\mathrm{d}x^3} = \frac{\mathrm{d}M(x)}{\mathrm{d}x} = V(x) \tag{1-175}
$$

$$
EI\frac{\mathrm{d}^4 v}{\mathrm{d}x^4} = \frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x} = w(x) \tag{1-176}
$$

上式中各符号的意义在前面已经有说明，而弯矩和曲率正负号的定义在材料力学书中有介绍，这里不再赘述。

1.4.4 梁的有限元公式

在介绍梁的有限元分析之前，先定义梁单元。最简单的梁单元由两个节点组成，每个节点有两个自由度，即一个竖向位移和一个转角，如图 1-19 所示。

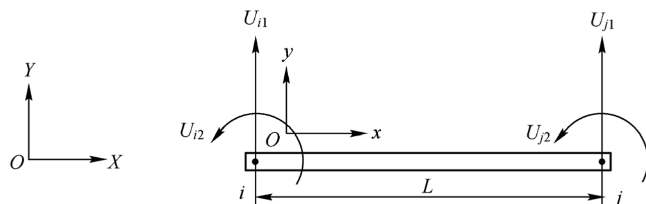


图 1-19 梁单元

每个梁单元有 4 个节点值，因此应该用 4 个未知系数的三次多项式来描述梁的位移特性，而且形函数的一阶导数应该是连续的。最终的形函数一般称为埃尔米特（Hermite）形函数。设竖向位移的三次多项式为

$$v = c_1 + c_2 x + c_3 x^2 + c_4 x^3 \tag{1-177}$$

在节点 i 和节点 j，位移函数应满足如下条件（用节点值表示）

- 节点 i： $x = 0, v = c_1 = U_{i1}$。
- 节点 i： $x = 0, \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}|_{x=0} = c_2 = U_{i2}$。
- 节点 j： $x = L, v = c_1 + c_2 L + c_3 L^2 + c_4 L^3 = U_{j1}$。
- 节点 j： $x = L, \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}|_{x=L} = c_2 + 2c_3 L + 3c_4 L^2 = U_{j2}$。

从上面可以得到一个含有 4 个未知数的方程组。求出 4 个未知数 c_1, c_2, c_3和c_4，代入式（1-177），进一步简化可得：

$$v = S_{i1}U_{i1} + S_{i2}U_{i2} + S_{j1}U_{j1} + S_{j2}U_{j2} \tag{1-178}$$

其中，S_{i1}, S_{i2}, S_{j1}和S_{j2} 为形函数，由下面式子给定

$$S_{i1} = 1 - \frac{3x^2}{L^2} + \frac{2x^3}{L^3} \tag{1-179}$$

$$S_{i2} = x - \frac{2x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \tag{1-180}$$

$$S_{j1} = \frac{3x^3}{L^2} - \frac{2x^3}{L^3} \tag{1-181}$$

$$S_{j2} = -\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \tag{1-182}$$

由式（1-179）～式（1-182）可知：在节点 $i(x=0)$ 上，$S_{1i} = 1, S_{i2} = S_{j1} = S_{j2} = 0$；$\dfrac{S_{i2}}{\mathrm{d}x} = 1, \dfrac{S_{i1}}{\mathrm{d}x} = \dfrac{S_{j1}}{\mathrm{d}x} = \dfrac{S_{j2}}{\mathrm{d}x} = 0$；在节点 j（$x = L$），$S_{i1} = 0, S_{i2} = S_{j1} = S_{j2} = 0$；$\dfrac{S_{j2}}{\mathrm{d}x} = 1, \dfrac{S_{i1}}{\mathrm{d}x} = \dfrac{S_{i2}}{\mathrm{d}x} = \dfrac{S_{j1}}{\mathrm{d}x} = 0$。

这些值就是 Hermite 三次多项式的特性。

至此，已了解了梁单元的特性，下面进一步推导梁单元的刚度矩阵。在下面的推导过程中，忽略了剪应力对应变能的影响。那么，任意梁单元(e)的应变能为

$$\Lambda^{(e)} = \int_V \frac{\sigma\varepsilon}{2}\mathrm{d}V = \int_V \frac{E\varepsilon^2}{2}\mathrm{d}V = \frac{E}{2}\int_V \left(-y\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)\mathrm{d}V \tag{1-183}$$

$$\Lambda^{(e)} = \frac{E}{2}\int_V \left(-y\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)\mathrm{d}V = \frac{E}{2}\int_0^L \left(\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)^2 \mathrm{d}x \int_A y^2 \mathrm{d}A \tag{1-184}$$

注意，积分$\int_A y^2 \mathrm{d}A$是单元截面的惯性矩I，则上式可进一步简化为

$$\Lambda^{(e)} = \frac{EI}{2}\int_0^L \left(\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)^2 \mathrm{d}x \tag{1-185}$$

然后，将位移用形函数和节点值的形式表示，则有：

$$\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2} = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}x^2}\begin{pmatrix} S_{i1} & S_{i2} & S_{j1} & S_{j2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U_{i1} \\ U_{i2} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{pmatrix} \tag{1-186}$$

为进一步简化推导和避免不必要的数学计算，在此要充分利用矩阵表示法。首先，将形函数的二阶导数定义为

$$D_{i1} = \frac{\mathrm{d}^2 S_{i1}}{\mathrm{d}x^2}$$

$$D_{i2} = \frac{\mathrm{d}^2 S_{i2}}{\mathrm{d}x^2}$$

$$D_{j1} = \frac{\mathrm{d}^2 S_{j1}}{\mathrm{d}x^2}$$

$$D_{j2} = \frac{\mathrm{d}^2 S_{j2}}{\mathrm{d}x^2}$$

然后将式（1-186）写成矩阵形式

$$\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2} = \boldsymbol{DU} \tag{1-187}$$

$\left(\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)^2$用矩阵$\boldsymbol{D}$和矩阵$\boldsymbol{U}$表示为：

$$\left(\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}x^2}\right)^2 = \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{DU} \tag{1-188}$$

于是，梁单元的应变能为：

$$\Lambda^{(e)} = \frac{EI}{2}\int_0^L \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{DU}^2 \mathrm{d}x \tag{1-189}$$

由于总势能是总应变能和外力功之差，故有

$$\Pi = \sum \Lambda^{(e)} - \sum FU \tag{1-190}$$

根据最小势能原理，平衡位置的位移总是使系统的总势能最小，对梁单元，即有

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U_k} = \frac{\partial}{\partial U_k}\sum \Lambda^{(e)} - \frac{\partial}{\partial U_k}\sum FU = 0, k = 1,2,3,4 \tag{1-191}$$

式中，U_k 分别取节点的位移值 U_{i1}，U_{i2}，U_{j1} 和 U_{j2}。

式（1-190）由两部分组成：应变能和外力功。应变能关于节点自由度的偏微分会形成梁单元刚度矩阵的计算公式，外力功的偏微分会形成载荷矩阵。应变能关于 U_{i1}，U_{i2}，U_{j1} 和 U_{j2} 的偏微分为

$$\frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial U_k} = \frac{EI}{2}\int_0^L \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\mathrm{d}x\boldsymbol{U} \tag{1-192}$$

展开式（1-192），有

$$\frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial U_k} = \frac{EI}{2}\int_0^L \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\mathrm{d}x\boldsymbol{U} = \frac{EI}{L^3}\begin{pmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} U_{i1} \\ U_{i2} \\ U_{j1} \\ U_{j2} \end{pmatrix}$$

每个节点具有两个自由度（竖向位移和转角）的梁单元的刚度矩阵为

$$\boldsymbol{K}^{(e)} = \frac{EI}{L^3}\begin{pmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{pmatrix} \tag{1-193}$$

1.4.5 载荷矩阵

形成节点载荷矩阵有两种方法：一是，对外力功进行偏微分，使总势能最小；二是，直接计算梁的反力。如图 1-20 所示，有一长度为 L 在均布载荷作用下的梁，其端点的反力和弯矩也如图 1-20 所示。

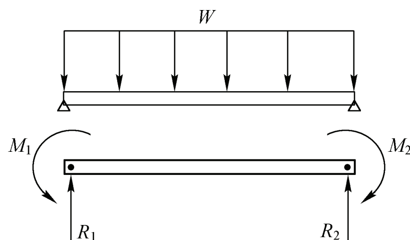


图 1-20 均布载荷作用下的梁单元

现利用第一种方法来计算载荷所做的外力功 $\int_L wv\mathrm{d}x$。第一步是利用形函数和节点值代替式中的位移函数，然后对外力功积分和对节点位移偏微分。

这种方法将在推导平面应力问题的载荷矩阵时详细讨论。为了全面了解有限元分析的过

程，现着手用另一种方法形成载荷矩阵

$$EI\frac{\mathrm{d}^4v}{\mathrm{d}x^4}=\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}=w(x)$$

在均布载荷作用下，$w(x)$ 是一个常量。对于上述方程积分，有

$$EI\frac{\mathrm{d}^3v}{\mathrm{d}x^3}=-wx+c_1 \tag{1-194}$$

应用边界条件 $[x=0,V(x)=R_1]$ 和式（1−194），$EI\frac{\mathrm{d}^3v}{\mathrm{d}x^3}|_{x=0}=R_1$，则有 $c_1=R_1$。将 c_1 的值代入式（1−194）并积分，得

$$EI\frac{\mathrm{d}^2v}{\mathrm{d}x^2}=-\frac{wx^2}{2}+R_1x+c_2 \tag{1-195}$$

应用边界条件 $[x=0,M(x)=-M_1]$ 和式（1−195），$EI\frac{\mathrm{d}^2v}{\mathrm{d}x^2}|_{x=0}=-M_1$，则有 $c_2=-M_1$。将 c_2 的值代入式（1−195）并积分，得

$$EI\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}=-\frac{wx^3}{6}+\frac{R_1x^2}{2}-M_1x+c_3 \tag{1-196}$$

应用边界条件 $x=0$ 时，转角为 0，即 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}|_{x=0}=0$，则有 $c_3=0$，代入上式并积分，有

$$EIv=-\frac{wx^4}{24}+\frac{R_1x^3}{6}-\frac{M_1x^2}{2}+c_4 \tag{1-197}$$

应用边界条件 $x=0$ 时，竖向位移为 0，$v(0)=0$，则有 $c_4=0$，为求 R_1 和 M_1 的值，在应用另外两个边界条件 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}|_{x=L}=0$ 和 $v(L)=0$，则有

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}|_{x=L}=-\frac{wL^3}{6}+\frac{R_1L^2}{2}-M_1L=0 \tag{1-198}$$

$$v(L)=-\frac{wL^4}{24}+\frac{R_1L^3}{6}-\frac{M_1L^2}{2}=0 \tag{1-199}$$

联立式（1−198）和式（1−199），解得 $R_1=\frac{wL}{2}$ 和 $M_1=\frac{wL^2}{2}$。根据本问题的对称性，另一端的反力也为 $R_1=\frac{wL}{2}$ 和 $M_1=\frac{wL^2}{2}$。

1.5 板的有限元方法

本节开始讨论二维形函数和二维单元的基本概念及其相关属性，同时也将介绍四边形单元与三角形单元的自然坐标系。另外，还将推导矩形单元、二次四边形单元以及三角形单元的形函数。

1.5.1 矩形单元

前面分析了一维问题，研究了梁单元及桁架单元的形函数的推导过程，通过对方程的求

解，得出了节点的值（位移、力等）。从本节开始研究二维问题，首先研究二维形函数和二维单元。为了方便理解，以直散热片为例进行分析。

根据这个散热片维数和热分布边界条件，温度沿着 X 方向和 Y 方向均发生了变化，此时再用一维函数就无法模拟散热片的温度分布情况。

记住，一维问题的解是用线段近似描述的，而二维问题的解是由平面描述的。图 1-21 清楚地说明了这一点，它详细地描述了典型的矩形单元及其节点值。

从图 1-22 可以清楚地看到，温度沿着单元的分布是坐标 X 和 Y 的函数。对任意矩形单元，可以用下式近似表示温度的分布，如：

$$T^{(e)} = b_1 + b_2 x + b_3 y + b_4 xy \tag{1-200}$$

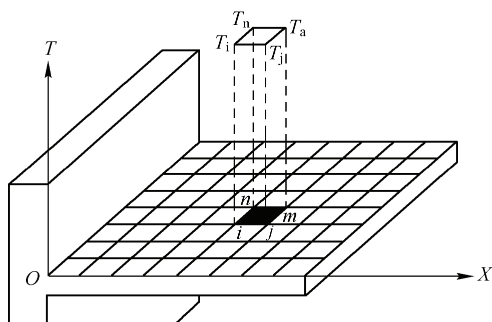


图 1-21　使用矩形单元描述二维温度分布的例子

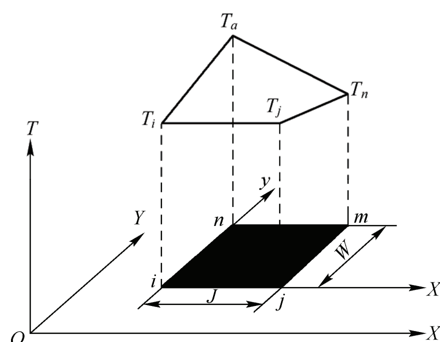


图 1-22　典型的矩形单元

注意，式（1-200）中有 4 个未知量，因为矩形单元是由 4 个节点 i,j,m,n 定义的。同时要注意，函数沿着单元边缘呈线性变化，而在单元内部呈非线性变化。具体这种性质的单元一般看作是双线性单元。二维形函数的推导和一维单元的推导过程基本相同。为得到 b_1,b_2,b_3,b_4，将使用局部坐标 x 和 y。考虑节点的温度，必须满足

$$\begin{aligned} T &= T_i, 在x=0, y=0处 \\ T &= T_j, 在x=l, y=0处 \\ T &= T_m, 在x=l, y=w处 \\ T &= T_n, 在x=0, y=w处 \end{aligned} \tag{1-201}$$

将式（1-201）给定的节点条件应用于式（1-200），并求解 b_1,b_2,b_3,b_4 有

$$b_1 = T_i \quad b_2 = \frac{1}{l}(T_j - T_i) \quad b_3 = \frac{1}{w}(T_n - T_i) \quad b_4 = \frac{1}{lw}(T_i - T_j + T_m - T_n) \tag{1-202}$$

将 b_1,b_2,b_3,b_4 代入式（1-200），并对参数分组，便得到单元由形函数表示的温度分布

$$T^{(e)} = \begin{pmatrix} S_i & S_j & S_m & S_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ T_j \\ T_m \\ T_n \end{pmatrix} \tag{1-203}$$

其中

$$S_i=\left(1-\frac{x}{l}\right)\left(1-\frac{y}{w}\right);\quad S_j=\frac{x}{l}\left(1-\frac{y}{w}\right)$$

$$S_m=\frac{xy}{lw};\quad S_n=\frac{y}{w}\left(1-\frac{x}{l}\right) \tag{1-204}$$

很显然，根据节点值$\Psi_1,\Psi_2,\Psi_3,\Psi_4$，可以使用这些形函数表示任意未知参数$\Psi$在矩形区域内的变化，它的一般形式可以写成

$$\Psi^{(e)}=\begin{pmatrix}S_i & S_j & S_m & S_n\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Psi_i\\ \Psi_j\\ \Psi_m\\ \Psi_n\end{pmatrix} \tag{1-205}$$

1.5.2 自然坐标

自然坐标实际上是局部坐标的无量纲形式。大多数有限元程序使用高斯积分公式进行单元的数值积分，且积分的上限和下限分别取为 1 和−1，而局部坐标系x,y的原点与自然坐标点$\xi=-1,\eta=-1$一致，如图 1−23 所示。

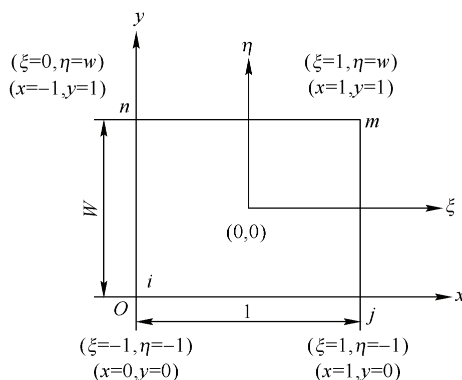


图 1−23　自然坐标系下的四边形单元

若令$\xi=\frac{2x}{l}-1,\eta=\frac{2y}{w}-1$，则由自然坐标$\xi$，$\eta$表示的形函数为

$$S_i=\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)$$

$$S_j=\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)$$

$$S_m=\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)$$

$$S_n=\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$$

这些形函数的基本性质与相应的一维形函数的基本性质大体上是一样的。

1.5.3 线性三角形单元

使用双线性矩形单元也存在缺点，其中最主要的缺点是它不能很好地满足弯曲边界的要求。相比之下，图 1-24 所示描述二维温度分布的三角形单元就能较好地描述弯曲边界。三角形单元由 3 个节点定义，如图 1-25 所示。因此，可用下式描述三角形区域内的独立变量，如温度的变化：

$$T^{(e)} = a_1 + a_2 X + a_3 Y \tag{1-206}$$

考虑图 1-25 所示的节点温度，它必须满足以下条件：

$$\begin{aligned} T &= T_i, \text{在} X = X_i, Y = Y_i \text{处} \\ T &= T_j, \text{在} X = X_j, Y = Y_j \text{处} \\ T &= T_k, \text{在} X = X_k, Y = Y_k \text{处} \end{aligned} \tag{1-207}$$

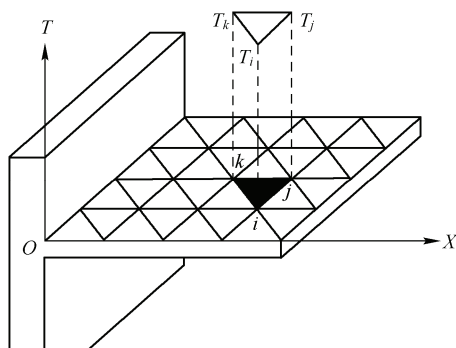


图 1-24 使用三角形单元描述二维温度分布

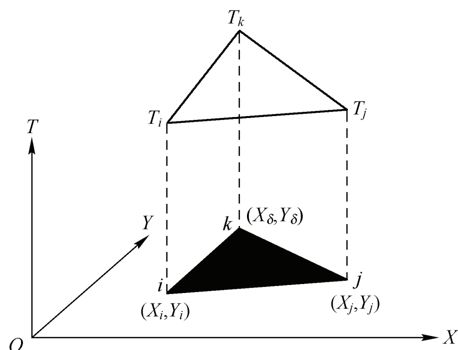


图 1-25 三角形单元

将节点值代入式（1-206），有：

$$\begin{aligned} T_i &= a_1 + a_2 X_i + a_3 Y_i \\ T_j &= a_1 + a_2 X_j + a_3 Y_j \\ T_k &= a_1 + a_2 X_k + a_3 Y_k \end{aligned} \tag{1-208}$$

求解 a_1, a_2, a_3 有：

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2A}[(X_j Y_k - X_k Y_j)T_i + (X_k Y_i - X_i Y_k)T_j + (X_i Y_j - X_j Y_i)T_k] \\ a_2 &= \frac{1}{2A}[(Y_j - Y_k)T_i + (Y_k - Y_i)T_j + (Y_i - Y_j)T_k] \\ a_3 &= \frac{1}{2A}[(X_k - X_j)T_i + (X_i - X_k)T_j + (X_j - X_i)T_k] \end{aligned} \tag{1-209}$$

1.6 应用实例

1.6.1 实例 1：求解悬索的位移

设长度为 L 的悬索均分为 5 个单元，其两端固定（$v_1 = v_6 = 0$），请利用单元刚度矩阵求解悬索的位移问题。这里 $F = 272\text{kg}$， $L = 304.8\text{cm}$， $k = 351.5\text{kg/m}^2$， $f = 35.7\text{kg/m}$ 。

解：令式（1-129）中的 $f(x)=v(x)$ ， $\alpha=F,\beta=k$ 和 $\gamma=f$ ，得到其变分函数为：

$$J(v)=\int_V \frac{1}{2}\left(F\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}(x)}{\mathrm{d}x}\right)^2+k\boldsymbol{v}^2(x)-2f\boldsymbol{v}(x)\right)\mathrm{d}V$$

对长度为 L 、横截面积为常数的单元，上式关于形函数的矩阵形式为：

$$J(v)=\frac{A}{2}\int_0^L \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\left(\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}x}\right)^{\mathrm{T}} F\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}x}\boldsymbol{v}\mathrm{d}V+\frac{A}{2}\int_0^L \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{kNv}\mathrm{d}x-A\int_0^L \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} f\mathrm{d}x$$

上式中的函数关于 $\{v\}$ 取极小值，有：

$$\frac{\partial J(v)}{\partial v}=\int_0^L\left(\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}x}\right)^{\mathrm{T}} T\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}x}\boldsymbol{v}\mathrm{d}x+\int_0^L \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{kNv}\mathrm{d}x-\int_0^L \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} f\mathrm{d}x=0$$

通常情况下，由于悬索的横截面积不会发生变化，这里删除了面积项。上式的第一项和第三项的 T 替换为 AE ，第二项包括了基本模量和形状函数，相应矩阵可以写为：

$$\int_0^L k\begin{pmatrix}\frac{(L-x)^2}{L^2} & \frac{(L-x)x}{L^2}\\ \frac{(L-x)x}{L^2} & \frac{x^2}{L^2}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}\mathrm{d}x$$

积分并合并同类项得到单元刚度矩阵：

$$\begin{pmatrix}\frac{Lk}{3} & \frac{Lk}{6}\\ \frac{Lk}{6} & \frac{Lk}{3}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}$$

悬索发生小位移的完整的单元刚度矩阵为：

$$\begin{pmatrix}F/L & -F/L\\ -F/L & F/L\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}kL/3 & kL/6\\ kL/6 & kL/3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}fL/2\\ fL/2\end{pmatrix}$$

将 $F=272\mathrm{kg}$ ， $L=304.8\mathrm{cm}$ ， $k=351.5\mathrm{kg/m^2}$ ， $f=35.7\mathrm{kg/m}$ 直接带入到上式中，构造的单元刚度矩阵为：

$$\begin{pmatrix}90 & -90\\ -90 & 90\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}400 & 200\\ 200 & 400\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}61\\ 61\end{pmatrix}$$

将 5 个单元的单元刚度矩阵通过公用节点连接起来，得到 6×6 阶的整体刚度矩阵：

$$\begin{pmatrix}29 & -23 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -23 & 58 & -23 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -23 & 58 & -23 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -23 & 58 & -23 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -23 & 58 & -23\\ 0 & 0 & 0 & 0 & -23 & 29\end{pmatrix}\begin{pmatrix}v_1\\ v_2\\ v_3\\ v_4\\ v_5\\ v_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}24\\ 48\\ 48\\ 48\\ 48\\ 24\end{pmatrix}$$

考虑到边界条件，可以删去矩阵的第一行、第一列及第六行、第六列，求解联立的方程

组可以得到节点处的位移值（见表 1-4）。

表 1-4 给出有限元解和真解的比较 （单位：cm）

节点	有限元解	真解
1	0.0	0.0
2	4.7112	4.6159
3	6.5793	6.4628
4	6.5793	6.4628
5	4.7112	4.6159
6	0.0	0.0

1.6.2 实例 2：求温度分布问题

图 1-26 所示的固体物质服从一定的温度微分方程，该方程的边界条件为混合边界条件。试采用等距离的 5 个线性单元，并由物质的厚度计算定常状态下的温度分布。这里设 $k = 250\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}), W = 0.1\text{m}, h_1 = 2000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}), h_2 = 5000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$，$T_1^{\infty} = 100℃$，$T_{12}^{\infty} = 50℃$。

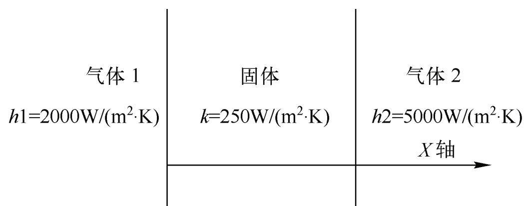


图 1-26 实例 2 模型

解：在 $x=0$ 处热量向物质内流动，该过程可以表示为：

$$-k\frac{\mathrm{d}T(0)}{\mathrm{d}x} + h_1[T(0) - T_1^{\infty}] = 0$$

类似的，在 $x=0.1$ 处热量从物质向外流出，该过程可以表示为：

$$-k\frac{\mathrm{d}T(0.1)}{\mathrm{d}x} + h_2[T(0.1) - T_2^{\infty}] = 0$$

与**实例 1** 一样，构造整体刚度矩阵，常数值的面积可以假定为单位面积 1，则有 $Ak/L = 250/0.02 = 12500$，代入边界条件之间的整体刚度矩阵为：

$$12500\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{pmatrix}$$

将 $x=0$ 处的边界条件写为

$$q_1 = h_1(T_1^\infty - T_1)$$

设常数值的面积为单位面积，即对单元 1 有

$$\int_S \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} q \mathrm{d}S = q_1\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}h_1T_1^\infty - h_1T_1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}20000 - 2000T_1\\0\end{pmatrix}$$

同理，$x = 0.1$ 处的边界条件可以写为

$$q_6 = h_2(T_2^\infty - T_6)$$

这样，单元 5 可以写成

$$q_1\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\h_2T_2^\infty - h_2T_6\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\25000 - 5000T_6\end{pmatrix}$$

联立以上 3 个矩阵并约去公因子得到如下矩阵

$$10000\begin{pmatrix}1.45 & -1.25 & 0 & 0 & 0 & 0\\ -1.25 & 2.50 & -1.25 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -1.25 & 2.50 & -1.25 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1.25 & 2.50 & -1.25 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -1.25 & 2.50 & -1.25\\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.25 & 1.75\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T_1\\T_2\\T_3\\T_4\\T_5\\T_6\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}20000\\q_2\\q_3\\q_4\\q_5\\25000\end{pmatrix}$$

得到相应的微分控制方程的解为：

$$T(x) = T_1^\infty - (T_1^\infty - T_2^\infty)\frac{(x/k + 1/h_1)}{(1/h_1) + (1/h_2) + (L/k)}$$

在保留小数点后 3 位的情况下，有限元解和解析解是相同的。节点处的解分别为：

$T_1 = 77.273, T_2 = 73.636, T_3 = 70.000, T_4 = 66.364, T_5 = 62.727$ 和 $T_6 = 59.091$。

1.7 本章小结

本章通过直接刚度法和能量法介绍了桥梁结构有限元分析的基本概念和一般步骤。在引入了结构几何非线性和材料非线性概念的同时，建立了桥梁结构非线性分析的增量平衡方程和求解思路，并以此为基础，给出了桥梁结构稳定的基本概念和求解两类稳定问题的方法。



第 2 章 几 何 建 模

ANSYS 16.0 是 ANSYS 公司的较新版本的多物理场分析平台，其提供了大量全新的先进功能，有助于用户更好地掌握设计情况从而提升产品性能和完整性。将 ANSYS 16.0 的新功能与 ANSYS Workbench 相结合，可以实现更加深入和广泛的物理场研究，并通过扩展满足客户不断变化的需求。

ANSYS 16.0 采用的平台可以精确地简化各种仿真应用的工作流程。同时，ANSYS 16.0 提供了多种关键的多物理场解决方案、前处理和网格剖分强化功能，以及一种全新的参数化高性能计算（HPC）许可模式，可以使设计探索工作更具扩展性。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
ANSYS 16.0 平台及各个模块的主要功能		√		
ANSYS Workbench 几何建模步骤			√	√
ANSYS Workbench 几何导入			√	√
ANSYS Workbench 草绘面板使用			√	√

2.1 ANSYS 16.0 平台及模块

ANSYS Workbench 16.0 软件平台的启动方法如图 2-1 所示，经常使用 ANSYS Workbench 16.0，程序会自动在开始菜单所有程序的上方出现 Workbench 16.0 的快速启动图标，如图 2-2 所示，此时可以单击 Workbench 16.0 按钮启动 Workbench 16.0。

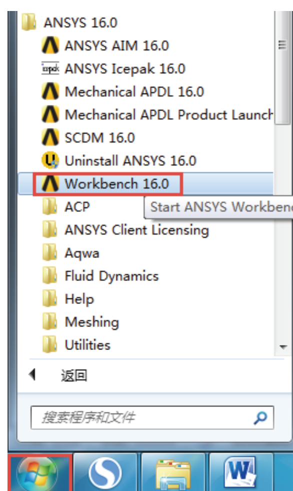


图 2-1　Workbench 启动路径

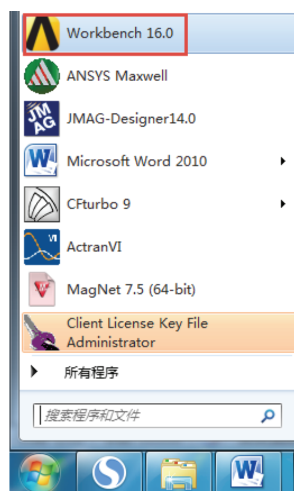


图 2-2　Workbench 快速启动

2.1.1 Workbench 平台界面

启动后的 Workbench 16.0 平台如图 2-3 所示。启动软件后，可以根据个人喜好设置下次启动是否同时开启导读对话框，如果不想启动导读对话框，将导读对话框底端的 √ 去除即可。

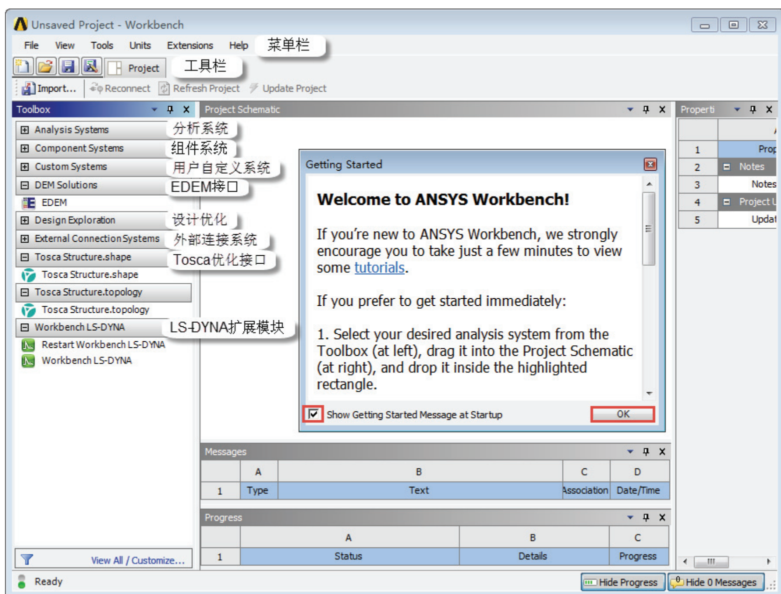


图 2-3　Workbench 软件平台

ANSYS Workbench 16.0 平台界面有以下几部分构成：菜单栏、工具栏、工具箱（Toolbox）、工程项目窗口（Project Schematic）、信息窗口（Message）、进程窗口（Progress）和属性窗口。

2.1.2 菜单栏

菜单栏包括 File（文件）、View（视图）、Tools（工具）、Units（单位）、Extensions（扩展）及 Help（帮助）6 个菜单。下面对这 6 个菜单中包括的子菜单及命令详述如下。

（1）File（文件）菜单中的命令

相关命令如图 2-4 所示，下面对 File（文件）菜单中的常用命令进行简单介绍：

1）New：建立一个新的工程项目，在建立新工程项目前，Workbench 软件会提示用户是否需要保存当前的工程项目。

2）Open…：打开一个已经存在的工程项目，同样会提示用户是否需要保存当前工程项目。

3）Save：保存一个工程项目，同时为新建立的工程项目命名。

4）Save As…：将已经存在的工程项目另保存为一个新的项目名称。

5）Import…：导入外部文件，单击 Import 命令会弹出图 2-5 所示的对话框，在 Import 对话框中的文件类型栏中可以选择多种文件类型。

注：文件类型中的 HFSS Project File（*.hfss）、Maxwell Project File（*.mxwl）和

Simplorer Project File（*.asmp）3 个文件需要安装 ANSYS Electromagnetics Suite 16.0 电磁系列软件才会出现。

ANSYS Workbench 16.0 平台支持 ANSYS Electromagnetics Suite 16.0 的安装。

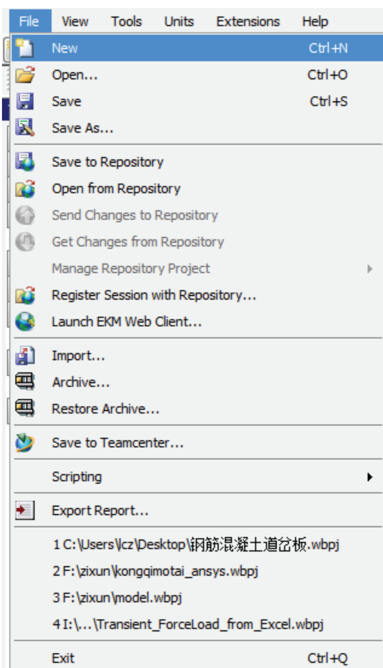


图 2-4　File 文件菜单

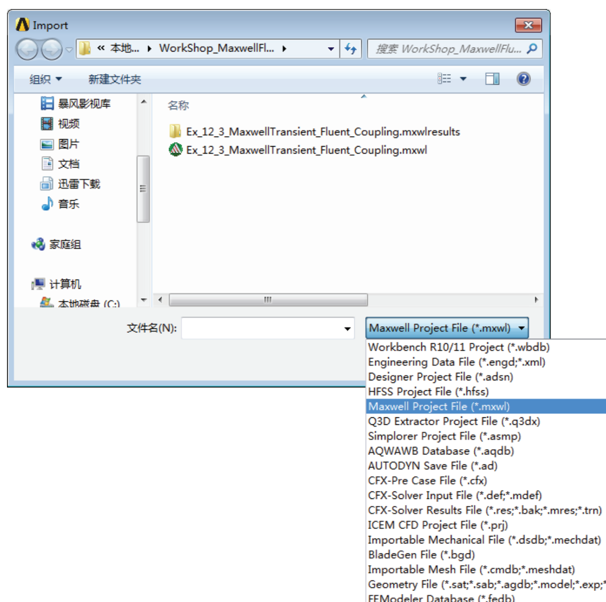


图 2-5　Import 支持文件类型

6）Archive：将工程文件存档，如果项目工程文件没有保存，软件会提示先保存文件。选择 Archive 命令后，在弹出的图 2-6 所示的 Save Archive 对话框中单击“保存”按钮，在弹出的图 2-7 所示的 Archive Options 对话框中勾选所有复选框，并单击 Archive 按钮将工程文件存档，在 Workbench 16.0 平台的 File 菜单中选择 Restore Archive 命令即可将存档文件读取出来，这里不再赘述，请读者自行完成。

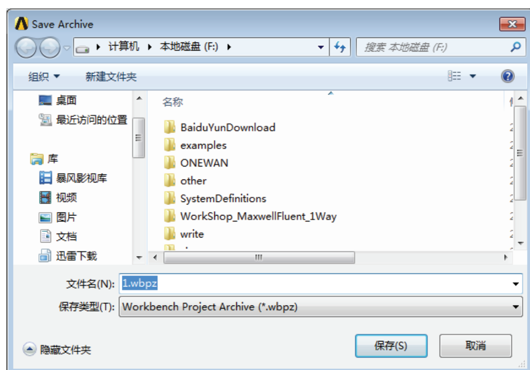


图 2-6　Save Archive 对话框

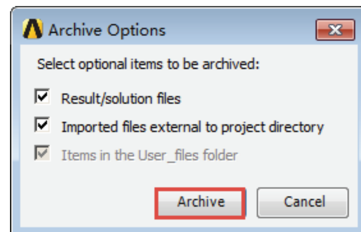


图 2-7　Archive Options 对话框

7）Scripting：脚本语言，ANSYS Workbench 平台支撑的脚本语言有 Python（*.py）及自带脚本（*.wbjn）两种格式。选择 Scripting 时，此时会出现图 2-8 所示的子菜单，子菜单中包括以下 3 个选项。

- Record Journal…：录制脚本语言，选择此命令后开始对 Workbench 平台中的所有操作用脚本语言进行记录，脚本格式为*.wbjn。
- Run Script File…：运行一个已经存在的脚本语言，包括*.wbjn 和*.py 两种格式，如图 2-9 所示。

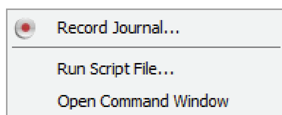


图 2-8　脚本命令

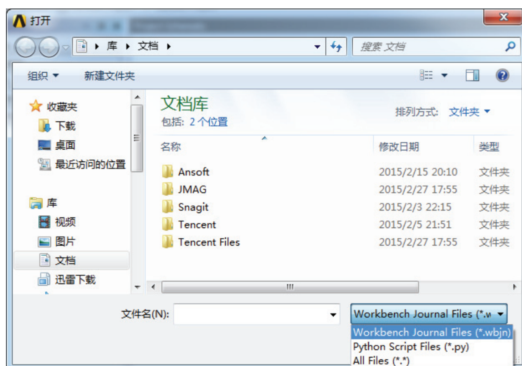


图 2-9　脚本格式

- Open Command Window：打开命令窗口，此时将弹出 Python 脚本语言对话框命令窗口，此时在窗口中输入如下代码。

```
print"Hello Workbench!"
```

这时将在下行中显示 Hello Workbench！字样，如图 2-10 所示，ANSYS Workbench 平台的脚本语言非常强大，通过 Workbench 平台能操作模块的建立、材料的添加等。

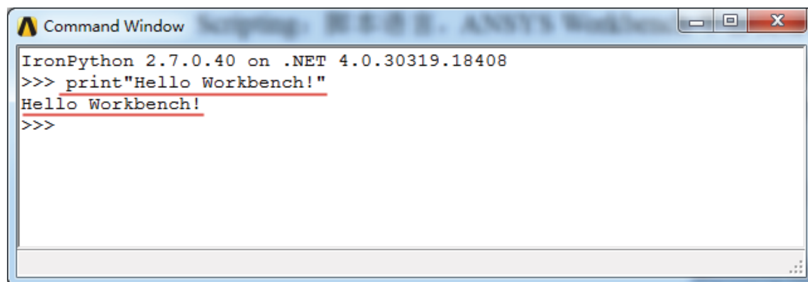


图 2-10　Python 脚本命令框

（2）View（视图）菜单中相关命令

相关命令如图 2-11 所示，下面对 View（视图）菜单中的常用命令作简要介绍：

1）Refresh（刷新）：刷新项目管理窗口。

2）Compact Mode（简洁模式）：选择此命令后，Workbench 16.0 平台将压缩为一个小图标 kongqimotai_ansys - Workbench 置于操作系统桌面上，同时在任务栏上的图标将消失。如果将鼠标移

动到 kongqimotai_ansys - Workbench 图标上，Workbench 16.0 平台将变成图 2-12 所示的简洁模式。

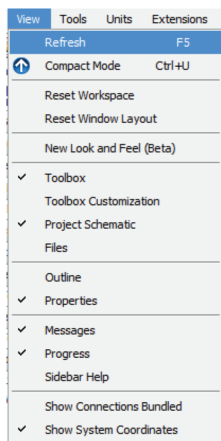


图 2-11 View 菜单

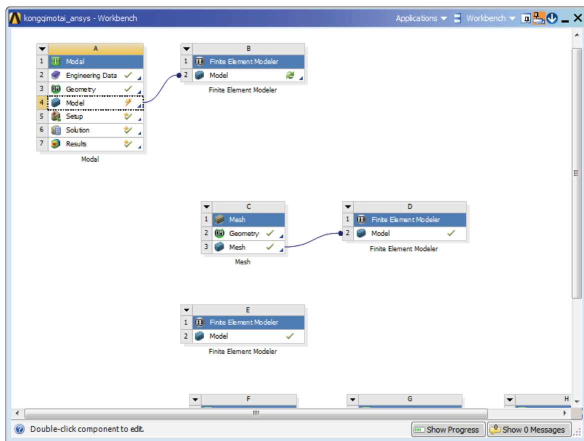


图 2-12 Workbench 16.0 简洁模式

3）Reset Workspace（复原操作平台）：将 Workbench 16.0 平台复原到初始状态。

4）Reset Window Layout（复原窗口布局）：如果平台的布局更改后，通过此命令能将 Workbench 16.0 平台窗口布局复原到初始状态。

5）Toolbox（工具箱）：选择 Toolbox 命令来选择是否隐藏左侧面的工具箱，Toolbox 前面有√说明 Toolbox（工具箱）处于显示状态，单击 Toolbox 取消前面的√后 Toolbox（工具箱）将被隐藏。

6）Toolbox Customization（用户自定义工具箱）：选择此命令后将在窗口中弹出图 2-13 所示的 Toolbox Customization 窗口，用户可通过单击各个模块前面的√来选择是否在 Toolbox 中显示该模块。

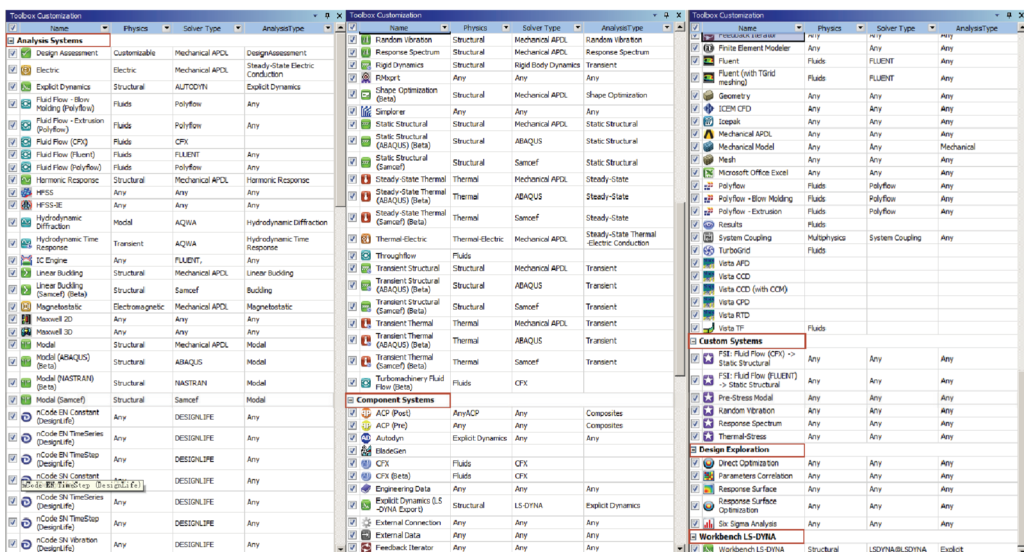


图 2-13 Toolbox Customization 窗口

7）Project Schematic（项目管理）：选择此命令来确定是否在 Workbench 平台上显示项目管理窗口。

8）Files（文件）：选择此命令会在 Workbench 16.0 平台下侧弹出图 2-14 所示的 Files 窗口，窗口中显示了本工程项目中所有的文件及文件路径等重要信息。

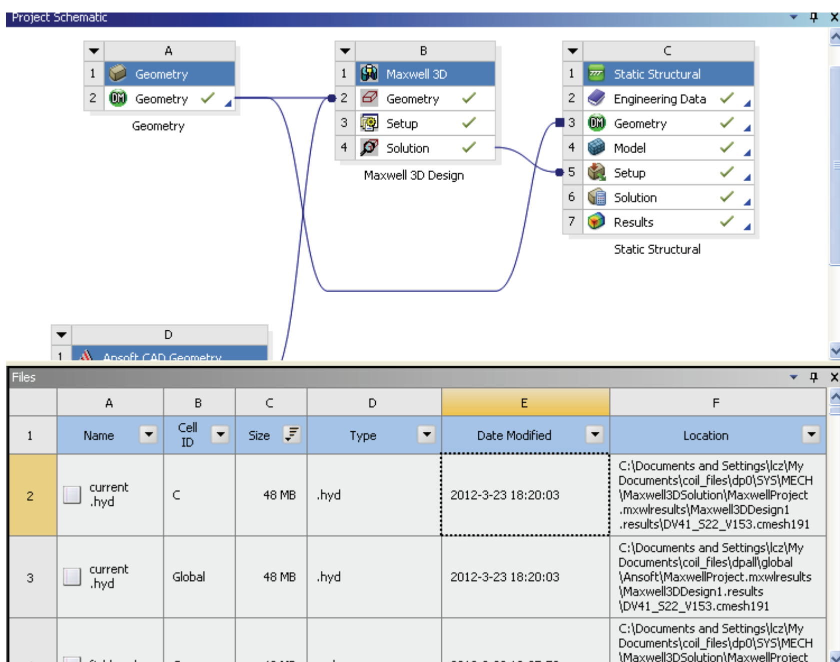


图 2-14　Files 窗口

9）Properties（属性）：选择此命令后再单击 C7 Results 表格，此时会在 Workbench 16.0 平台右侧弹出图 2-15 所示的 Properties of Schematic C7：Results 对话框，对话框里面显示的是 C7 Results 栏中的相关信息，此处不再赘述。

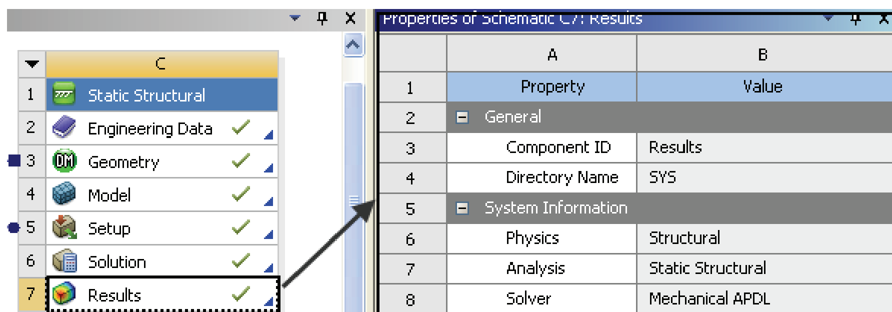


图 2-15　Properties of Schematic C7：Results 对话框

（3）Tools（工具）菜单中的命令

相关命令如图 2-16 所示，下面对 Tools 中的常用命令进行介绍：

1）Refresh Project（刷新工程数据）：当上行数据中内容发生变化，需要刷新板块（更新也会刷新板块）。

2）Update Project（更新工程数据）：数据已更改，必须重新生成板块的数据输出。

3）License Preferences（参考注册文件）：选择此命令后，会弹出图 2-17 所示的注册文件对话框。

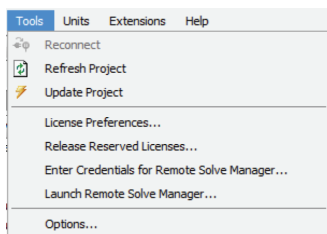


图 2-16 Tools 菜单

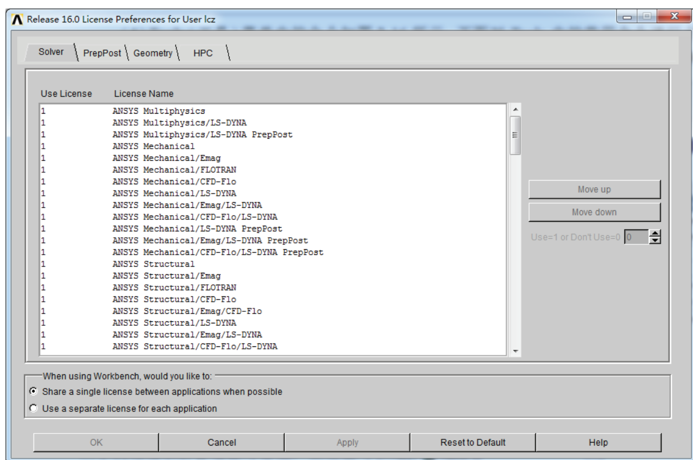


图 2-17 Release 16.0 License Preferences for User lcz 对话框

4）Enter Credentials for Remote Solve Manager…（输入远程计算管理证书）：选择此命令后，将弹出图 2-18 所示的 Set Possword 对话框，用于远程求解计算时的密码设置。

5）Launch Remote Solve Manager（加载远程求解器管理器）：选择此命令会弹出图 2-19 所示的 ANSYS® Remote Solve Manager Release 16.0 对话框，在这里可以进行远程求解的提交工作。

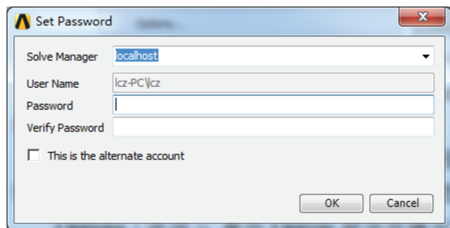


图 2-18 Set Password 对话框

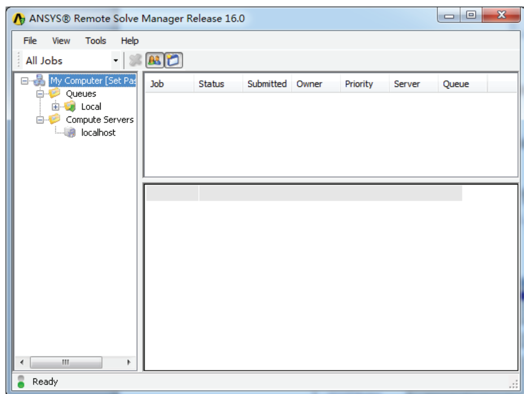


图 2-19 ANSYS® Remote Solve Manager Release 16.0 对话框

6）Options（选项）：选择 Option 命令会弹出 Options 对话框，对话框中主要包括以下选项卡：

- Project Management（项目管理）选项卡：在图 2-20 所示的 Project Management 选项卡中可以设置 Workbench 16.0 平台启动的默认目录和计算时的临时文件的位置、是否启动导读对话框及是否加载新闻信息、项目工程文件压缩等级等参数。
- Appearance（外观）选项卡：在图 2-21 所示的外观选项卡中可对 Workbench 平台中的部分软件模块的背景颜色、文字颜色、几何图形的边等进行颜色设置，同时也可

以启动 Beta（测试）选项等，如图 2-22 所示为启动 Beta 选项前后 Toolbox 选项卡中的对比。

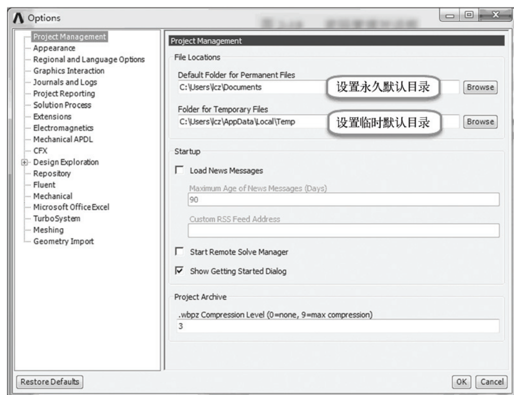


图 2-20　Project Managerment 选项卡

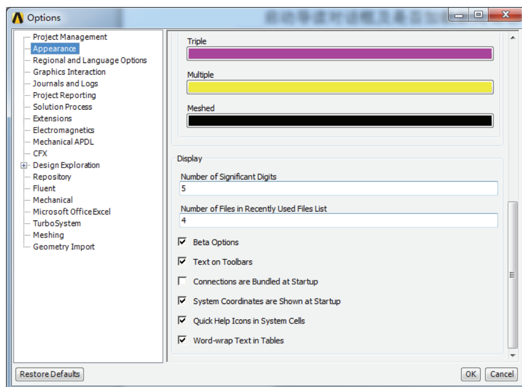


图 2-21　Appearance 选项卡

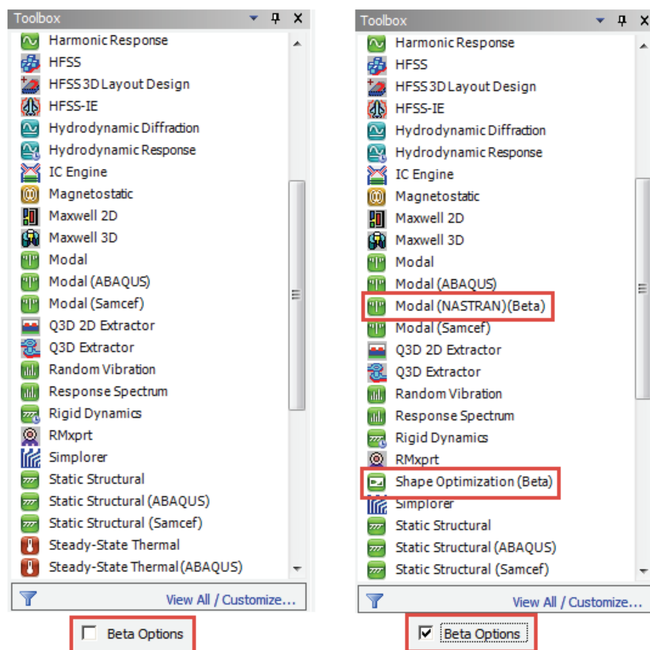


图 2-22　Beta 选项开启与否 Toolbox 选项卡的对比

- Regional and Language Options（区域和语言选项）选项卡：通过图 2-23 所示的选项可以设置 Workbench 16.0 平台的语言，其中包括德语、英语、法语及日语 4 种。
- Graphics Interaction（几何图形交互）选项卡：在图 2-24 所示的选项卡中可以设置鼠标对图形的操作，如平移、旋转、放大、缩小、多体选择等，下面以常用的三键鼠标（见图 2-25）为例进行说明。

Mouse Wheel（鼠标滚轮）：设置鼠标滚轮可以执行缩放（Zoom）操作或者无响应（None），默认为缩放（Zoom）操作。

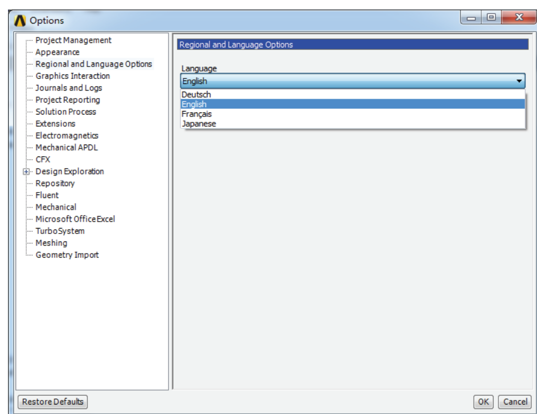


图 2-23 Regional and Language Options 选项卡

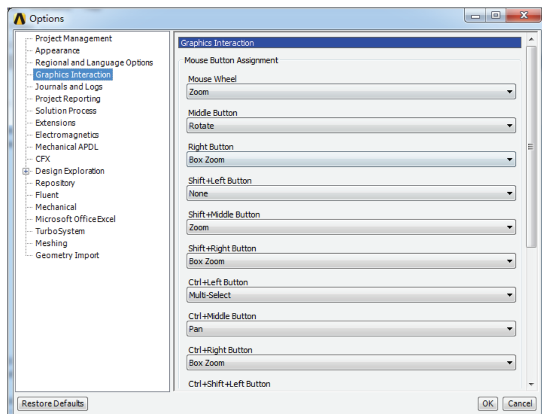


图 2-24 Graphics Interaction 选项卡

Middle Button（三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为旋转（Rotate）操作。

Right Button（三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作。

Shift+Left Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的左键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为无响应（None）。



图 2-25 三键鼠标

Shift+Middle Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为缩放（Zoom）操作。

Shift+Right Button（键盘的〈Shift〉键+三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作。

Ctrl+Left Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的左键）：可设置为多选（Multi-Select）、旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为多选（Multi-Select）操作。

Ctrl+Middle Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的中键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为平移（Pan）操作。

Ctrl+Right Button（键盘的〈Ctrl〉键+三键鼠标的右键）：可设置为旋转（Rotate）、平移（Pan）、缩放（Zoom）、框选缩放（Box Zoom）及无响应（None），默认为框选缩放（Box Zoom）操作。

Ctrl+Shift+Left Button（键盘的〈Ctrl〉键+〈Shift〉键+三键鼠标的左键）：可设置为多选（Multi-Select）及无响应（None），默认为无响应（None）。

Dynamic Viewing During Rotation（转动时动态视觉效果）：选中此命令，当转动几何

时，将可以动态观察视觉效果。

Extend Selection Angle Limit（扩展选中角度限制）：默认为 20°，读者可以根据几何特点更改此角度，以方便几何选择时的扩展应用。

Angle Increment for Configure Tool（角度增量配置工具）：默认为 10°，根据需要读者可调整角度增量值。

● Journal and Logs（日志）选项卡：单击此选项卡在右侧将显示录制脚本语言的默认文件路径，同时也可设置 Log（日志）文件路径及日志文件保存的时间，如图 2-26 所示。

● Solution Process（求解过程）选项卡：设置求解过程中一些显示及处理，有如下几个命令，如图 2-27 所示。

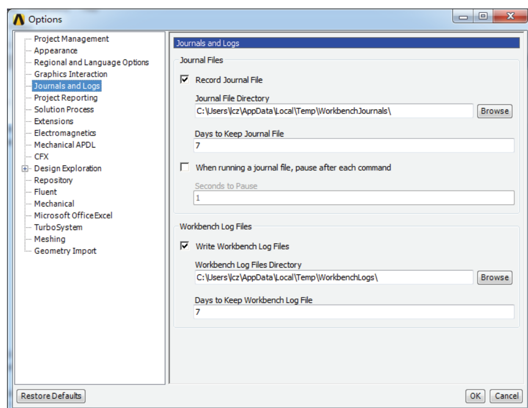


图 2-26　Journal and Logs 选项卡

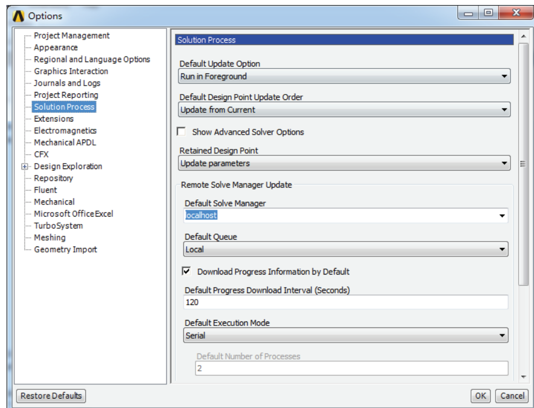


图 2-27　Solution Process 选项卡

Default Update Option（默认更新选项）：包括 Run in Foreground（运行在前端）、Run in Background（运行在后台）及 Submit to Remote Solve Manager（提交远程求解管理器）3 个选项，默认为 Run in Foreground（运行在前端）。

Default Design Point Update Order（默认设计节点更新序列）：包括 Update from Current（从当前开始更新）及 Update Design Points in Order（按顺序更新设计点），默认为 Update from Current（从当前开始更新）。

Show Advanced Solver Options（显示高级求解器选项）：是否显示高级求解器选项。

Retained Design Point（保留设计点）：包括 Update parameters（更新参数）及 Update full project（更新所有项目文件）两个选项。

Default Execution Mode（默认执行模式）：包括 Serial（顺序模式）和 Parallel（并行模式）两种类型，当选中并行模式后，下面的 Default Number of Processes（默认处理器数量）被激活，此时可根据 CPU 的数量设置并行计算所使用 CPU 的数量。

● Extensions（扩展）选项卡：在扩展选项卡中用户可以将自己编写的并编译成*.wbex 格式程序代码的目录添加到 Additional Extension Folders（添加外部文件夹路径），如果有多个文件夹，则中间用分号（;）隔开即可，如图 2-28 所示，添加了一个文件路径；在 Save Binary Extensions with Project（将二进制扩展文件保存到工程项目），可以选择是否保存。这部分内容在后面有介绍，这里不再赘述。

- Electromagnetics（电磁分析）选项卡：在图 2-29 所示的选项卡中可以添加像 HFSS、Maxwell、Simplorer、Designer 及 Q3D Extractor 软件启动程序目录，当 ANSYS Electromagnetics Suite 16.0 电磁软件模块安装完成后，此文件路径自动被添加到相应的目录中。

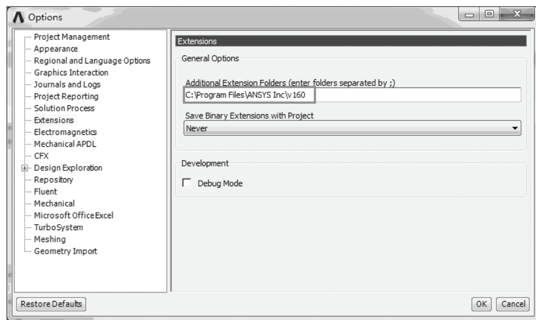


图 2-28 Extensions 选项卡

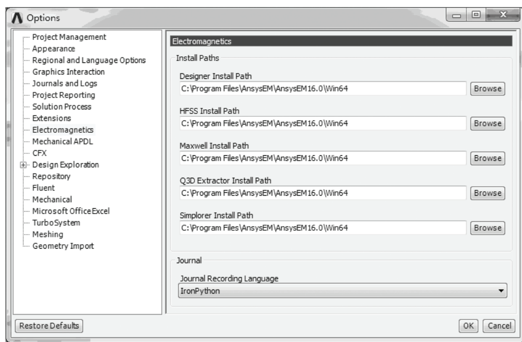


图 2-29 Electromagnetics 选项卡

Journal Recording Language（脚本录制语言）：可以设置使用 IronPython 或者 VBS 语言格式来录制电磁分析时的脚本文件。

- Mechanical APDL（ANSYS APDL 分析平台）选项卡：图 2-30 所示的选项卡中可以设置 Command Line Option（命令行选项）、Database Memory（数据库内存大小）、Workspace Memory（工作目录内存使用量）、Processors（处理器个数）及是否开启 GPU 加速选项等。
- CFX（CFX 流体动力学分析模块）选项卡：在 Set the default initialization option for the solution cell（为流体分析流程图的求解栏中设置默认的初始化选项）下面有两个选项卡，分别是 Update from current solution data if possible（从当前分析的数据进行刷新）和 Update from initial condition（从初始条件进行刷新）两个选项，如图 2-31 所示。

在下面的选择栏中可以选择不同的方式设置默认的执行命令来控制冲突选项，包括：Warn（警告）、Use Setup Cell Execution Control（使用建立 Setup 执行控制）和 Use Solution Cell Execution Control（使用建立 Solution 执行控制）3 个选项。

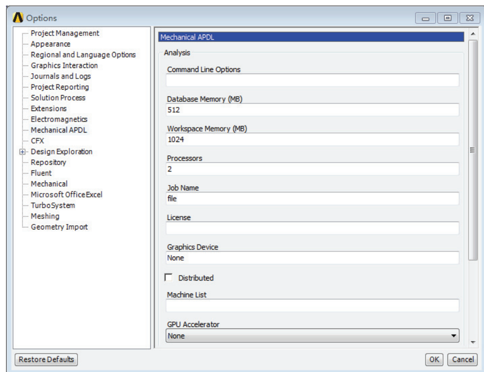


图 2-30 APDL 选项卡

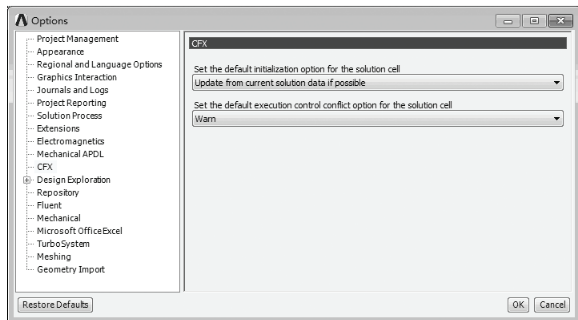


图 2-31 CFX 选项卡

- Design Exploration（设计开发）选项卡：如图 2-32 所示，选项卡中包括 Show



Advanced Options（是否显示高级选项）。在 Design Points（设计点）下面有 Preserve Design Points After DX Run（在 DX 运行完成后是否保存设计节点），如果选中，则 Retain Data Design for Each Preserved Design Point（为每个保存的设计节点保留数据设计点）将被激活；当 Retry All Faled Design Points（重试所有失败设计节点）被选中，则可以在下面设置 Number of Retries（重试次数）和 Retry Delay（重试延时时间（单位为秒））等，在设计开发选项卡下面有 3 个子选项卡。

① Design of Experiments（实验设计）子选项卡：图 2-33 所示的实验设计选项卡中可以对 Design of Experiments Type（实验设计类型）进行选择，有如下 4 个选项。

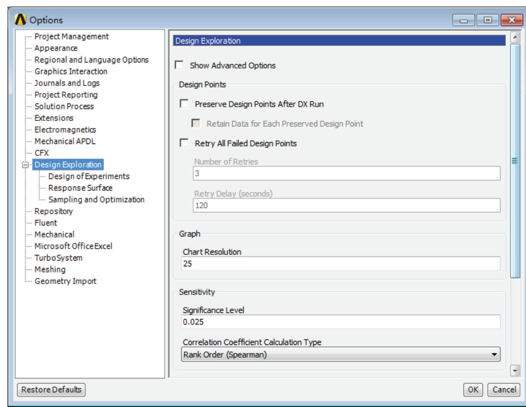


图 2-32　Design Exploration 选项卡

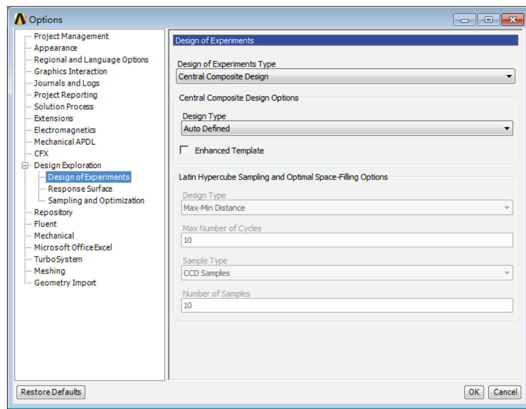


图 2-33　Design of Experiments 选项卡

Central Composite Design（中心复合试验设计，也简称为 CCD）：中心复合实验设计是在二水平权因子和分部实验设计的基础上发展出来的一种实验设计方法，它是二水平全因子和分部实验设计的拓展。通过对二水平实验增加一个设计点（相当于增加了一个水平），从而可以对评价指标（输出变量）和因素间的非线性关系进行评估。它常用于在需要对因素的非线性影响进行测试的实验；当选择 CCD 时，下面的选项卡中有 5 种实验类型，即 Auto Defined（自动定义）、G-Optimality（G 优化设计）、VIF-Optimality（VIF 优化设计）、Rotatable（旋转性设计）和 Face-Centered（面心设计）。

Optimal Space-Filling Design（最佳的空间填充设计）：在整个设计空间均匀分布，空间填充能力强，适用于后续的 Kriging, Non-arametricRegression，Neural Networks 的响应面类型，为了节省计算时间，可以指定样本数，样本有可能没有落在角落及中点；当选择 Optimal Space-Filling Design 选项时，下面的 Latin Hypercube Samplingand Optimal Space-Filling Design 栏的类型中有 3 个选项，即 Max-Min Distance（最大-最小距离）、Centered L2（中心化 L2）和 Maximum Entropy（最大熵）；在样本类型栏中有 5 个样本类型选项，即 CCD Sample（中心复合实验设计样本）、Linear Model Samples（线性模型样本）、Pure Quadratic Model Samples（纯二次模型样本）、Full Quadratic Model Samples（完全二次模型样本）及 User Defined Samples（用户定义样本），最后一栏中设置样本数量。

Box-Behnken Design（Box-Behnken 实验设计）：Box-Behnken 实验设计是可以评价指标和因素间的非线性关系的一种实验设计方法，和中心复合设计（CCD）不同的是它不需要连续进行多次实验，并且在因素数相同的情况下，Box-Behnken 实验的实验组合数比中心复合设计（CCD）少，因此较为经济。Box-Behnken 实验设计常用于在需要对因素的非线性影

响进行研究时的实验。

Latin Hypercube Sampling Design（拉丁超立方抽样设计）：计算机实验中广泛采用的一种设计是拉丁超立方设计。一个包含 n 次试验和 m 个变量的拉丁超立方设计可以用一个 $n\times m$ 矩阵表示，其中每一列都是向量(1，2，…，n)的一个置换，称一个拉丁超立方设计为正交拉丁超立方设计。

② Response Surface（响应曲面）子选项卡：图 2-34 所示的响应曲面子选项卡中可以设置相应曲面的类型，有 Standard Response Surface-Full 2nd Order Polynomials（标准响应曲面-完全二阶多项式模型）、Kriging（克里金模型）、Non-Parametric Regression（非参数回归模型）及 Neural Network（神经网络模型）；当选择克里金模型时，下面的 Kriging Option（克里金选项）被激活，在 Kernel Variation Type（内核变量类型）中有 Variable Kernel Variation（变量内核变动）和 Constant Kernel Variation（常量内核变动）两种选项卡。

③ Sampling and Optimization（抽样和优化）子选项卡：图 2-35 所示的抽样和优化子选项卡中可以设置 Random Number Generation（随机数生成）是否为 Repatability（可重复性），Weighted Latin Hypercube（加权拉丁超立方模型）的 Sampling Magnification（抽样放大率）的数量，在 Optimization（优化）栏中的 Constraint Handling（约束方式）栏中可以选择 Strict（精确的）和 Relaxed（非精确的）两种选项。

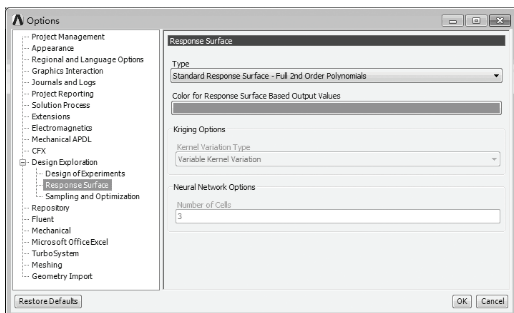


图 2-34　Response Surface 子选项卡

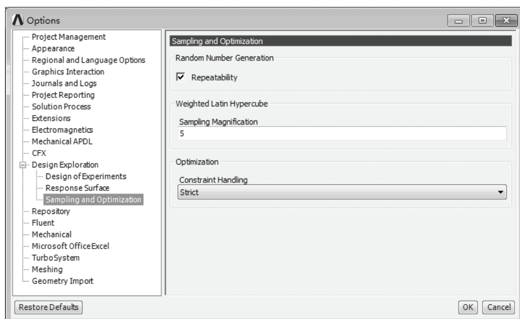


图 2-35　Sampling and Optimization 子选项卡

- Fluent（流体动力学）选项卡：图 2-36 所示的 Fluent 分析模型软件设置选项卡中可以完成 Fluent 软件的相关设置并设置为启动默认项，如在 General Options（一般选项中）可以设置在编辑计算时是否显示一些警告、启动新的计算时是否自动删除原来的结果，在 Default Options for New Fluent System（新建 Fluent 系统的默认设置）中可以设置在启动程序的时候是否显示启动栏、读完数据后是否显示网格、是否将 Fluent 的 GUI 界面嵌入到窗口中、是否应用 Workbench 统一的颜色方案及是否同时启动 UDF 编译环境，同时也可以设置 Precision（计算精度）是 Single Precision（单精度）还是 Double Precision（双精度），在 Setup Cell 中选择是否同时产生输出的 case 文件，在 Solution 中选择显示求解过程中的监视及是否产生一个可以被改写的文件。
- Mechanical 选项卡：图 2-37 所示的 Mechanical 选项卡中可以设置关联几何数据模型后是否自动删除接触、并行计算的最大使用内核数量的设置等。
- Microsoft Office Excel 选项卡：图 2-38 所示的 Microsoft Office Excel 选项卡中可以设置变量数据名的前缀过滤格式。

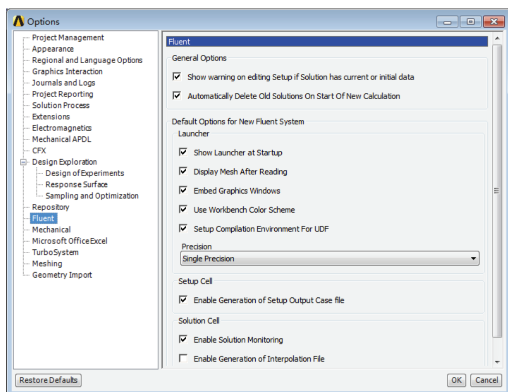


图 2-36　Fluent 选项卡

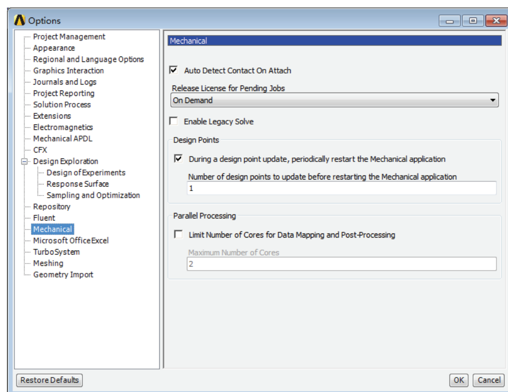


图 2-37　Mechanical 选项卡

- Geometry Import（几何导入）选项卡：图 2-39 所示的几何导入选项卡中可以选择几何建模工具，即 DesignModeler 和 SpaceClaim Direct Modeler；SpaceClaim Preferences（SpaceClaim 偏好设置）可以设置是否将 SpaceClaim 直接建模软件作为外部 CAD 软件。

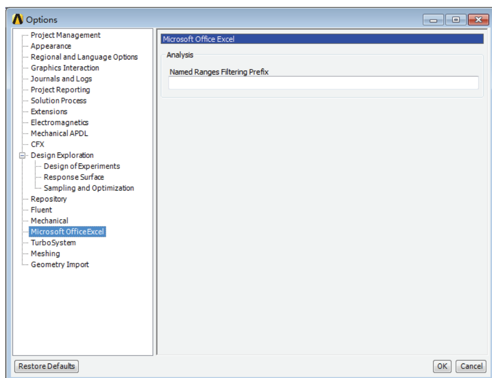


图 2-38　Microsoft OfficeExcel 选项卡

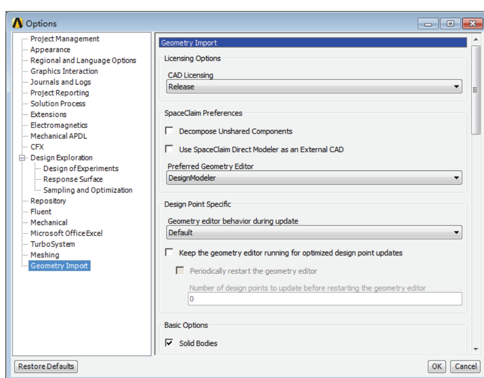


图 2-39　Geometry Import 选项卡

这里仅仅对 Workbench 16.0 平台与建模及分析相关并且常用的选项进行简单介绍，其余选项请读者参考帮助文档的相关内容。

（4）Units（单位）菜单

相关菜单如图 2-40 所示，在此菜单中可以设置国际单位、米制单位、美制单位及用户自定义单位，单击 Unit Systems（单位设置系统），在弹出的图 2-41 所示的 Unit Systems 对话框中可以制定用户喜欢的单位格式。

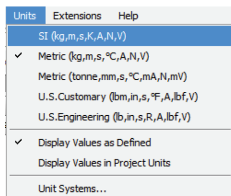


图 2-40　Units 菜单

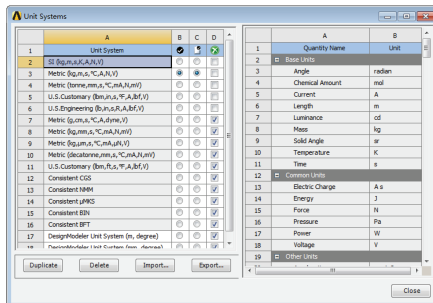


图 2-41　Unit Systems 对话框

（5）Extensions（扩展）菜单

如图 2-42 所示的扩展菜单式 ANSYS Workbench 16.0 平台中新增加的模块，在模块中可以添加 ACT（客户化应用工具套件），这里对此模块不再赘述。

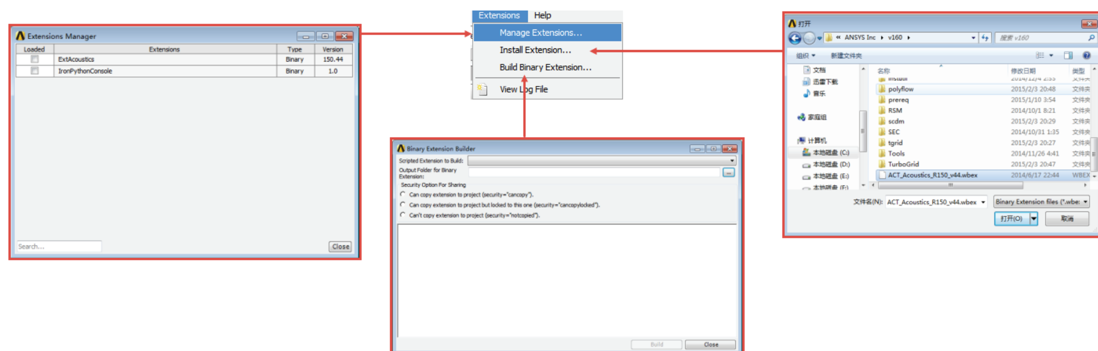


图 2-42　扩展菜单

（6）Help（帮助文档）菜单

在帮助菜单中，软件可实时的为用户提供软件操作及理论上的帮助。

2.1.3 工具栏

Workbench 16.0 的工具栏如图 2-43 所示，命令已经在前面菜单中出现，这里不再赘述。



图 2-43　工具栏

2.1.4 工具箱

工具箱（Toolbox）位于 Workbench 16.0 平台的左侧，如图 2-44 所示为工具箱（Toolbox）中包括 4 个基本分析系统模块和一个插件分析模块。

1）下面针对上述 4 个基本分析系统模块简要介绍其包含的内容。

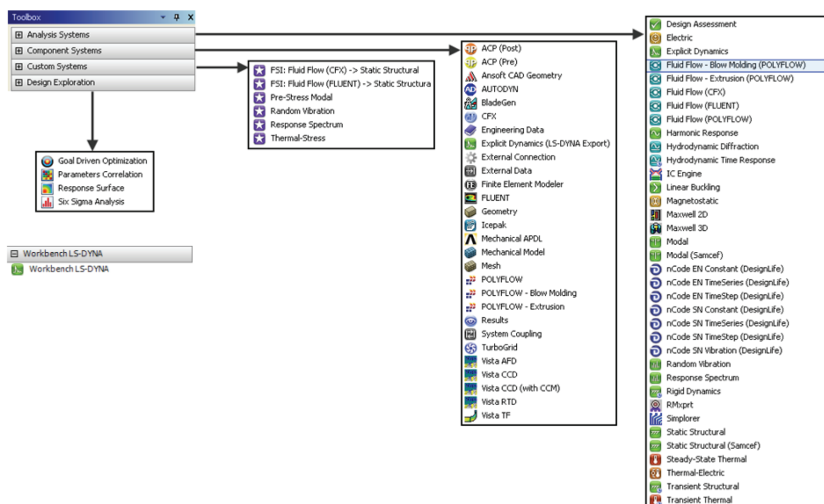


图 2-44　Toolbox（工具箱）

● Analysis Systems（分析系统）：分析系统中包括不同的分析类型，如静力分析、热分析、流体分析等，同时模块中也包括用不同种求解器求解相同分析的类型，如静力分析就包括用 ANSYS 求解器分析和用 SAMCEF 求解器分析两种。图 2-45 所示为分析系统中所包含的分析模块的说明。

注：在 Analysis Systems（分析模块）中需要单独安装的分析模块有 Maxwell 2D（二维电磁场分析模块）、Maxwell 3D（三维电磁场分析模块）、RMxprt（电机分析模块）、Simplorer（多领域系统分析模块）及 nCode（疲劳分析模块）。读者单独安装此模块即可。

● Component Systems（组件系统）：组件系统包括应用于各种领域的几何建模工具及性能评估工具，组件系统包括的模块如图 2-46 所示。

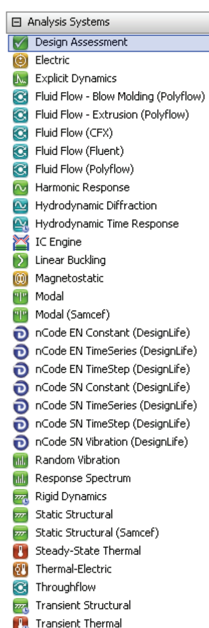


图 2-45　Analysis Systems（分析系统）

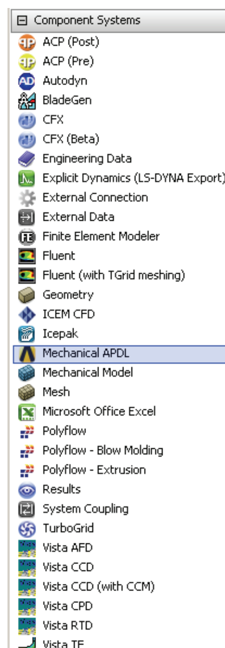


图 2-46　Component Systems（组件系统）

● Custom Systems（用户自定义系统）：在图 2-47 所示的用户自定义系统中，除了有软件默认的几个多物理场耦合分析工具外，Workbench 16.0 平台还允许用户自己定义常用的多物理场耦合分析模块。

● Design Exploration（设计优化）：图 2-48 所示为设计优化模块，在设计优化模块中允许用户通过 5 种工具对零件产品的目标值进行优化设计及分析。

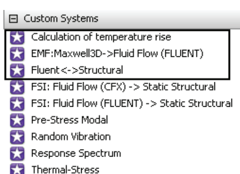


图 2-47　Custom Systems（用户自定义系统）

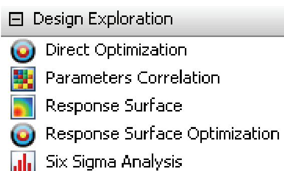


图 2-48　Design Exploration（设计优化）

2）外接插件分析模块，Workbench 分析平台以其易用性及良好的兼容性，除了被广大用户广泛学习和使用外，还被一些程序生产厂商作为一个接口平台，将程序集成到 Workbench 平台中进行扩展分析，如图 2-49 所示。

- 法国达索公司的 SIMULIA Tosca Structure 无参数结构优化软件开发了基于 Workbench 平台的接口程序——Tosca Extension for ANSYS Workbench，仅需要通过 Extension 接口即可将 Tosca Structure 外接程序接口集成到 Workbench 平台中进行结构的优化分析。
- 英国的 DEM－Solutions 公司为其主打的离散元计算程序开发了基于 Workbench 平台的插件程序——EDEM Add-In for ANSYS® Workbench™，通过此接口模块能将离散元 EDEM 程序计算的粒子与 Workbench 平台中的结构分析模块进行单项耦合受力分析。

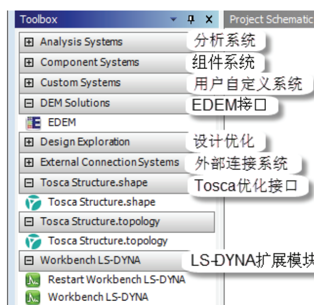


图 2-49　外接口程序模块

- Workbench LS-DYNA（显式动力学分析模块）：在显示动力学分析模块中程序将使用 LS-DYNA 求解器对模型进行显式动力学分析，这个模块需要用户单独安装插件。

下面用一个简单的实例来说明如何在用户自定义系统中建立用户自己的分析模块。

Step1：启动 Workbench 16.0 后，单击左侧 Toolbox（工具箱）→Analysis System（分析系统）中的 Maxwell 3D Design（三维电磁）模块不放，直接拖拽到 Project Schematic（工程项目管理窗口）中，如图 2-50 所示，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中生成一个如同 Excel 表格一样的 Maxwell 3D Design 分析流程图表。

注：Maxwell 3D Design 分析图表显示了执行 Maxwell 3D Design 流体分析的工作流程，其中每个单元格命令代表个每一个分析流程步骤。根据 Maxwell 3D Design 分析流程图标从上往下执行每个单元格命令，就可以完成流体的数值模拟工作，具体流程为：A2：Geometry 得到模型几何数据、进行网格的控制与剖分→A3：Setup 进行边界条件的设定与载荷的施加→A4：Solution 进行分析计算。

Step2：双击 Analysis System（分析系统）中的 Geometry（几何）模块和 Icepak（流体分析）模块，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中的项目 A 下面生成项目 B 和项目 C，如图 2-51 所示。

Step3：双击 Component System（组件系统）中的 Feedback Iterator（反馈插值）模块，此时会在 Project Schematic（工程项目管理窗口）中的项目 A 右侧生成项目 B，如图 2-52 所示。

注意：此时模块单元的排列顺序将发生变化，请读者自己对比。

Step4：创建好 4 个模块后，单击 A2:Geometry 不放，直接拖拽到 C2:Geometry 中，如图 2-53 所示。

Step5：同样操作，将 C2:Geometry 拖拽到 D2:Setup，将 A4:Solution 拖拽到 D2:Setup，将 A3:Setup 直接拖拽到 B2:Feedback Iterator 中，操作完成后项目连接形式如图 2-54 所示，此时在项目 A 和项目 D 中的 Solution 表中的图标变成了[图标]，即实现了项目 A 和项目 D 的双向耦合计算。

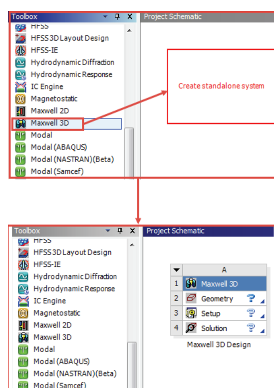


图 2-50　创建 FLUENT 分析项目

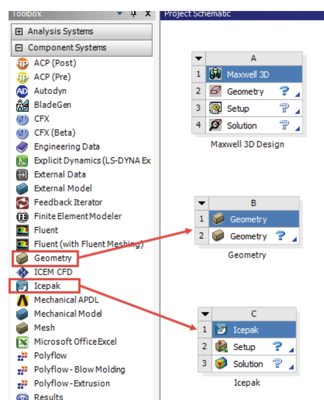


图 2-51　创建结构分析项目

注：在工程分析流程图表之间如果存在 ▪（一端是小正方形），表示数据共享；工程分析流程图表之间如果存在 •（一端是小圆点），表示实现数据传递。

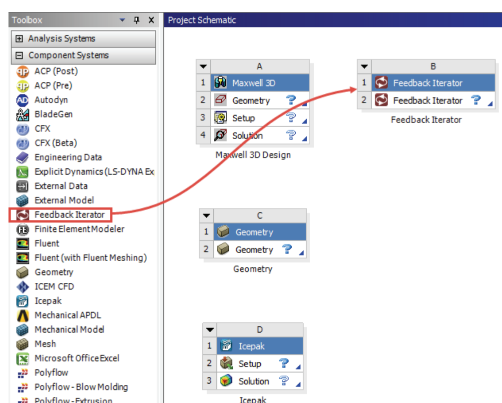


图 2-52　插值反馈模块

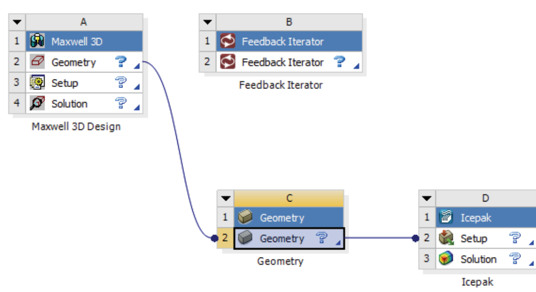


图 2-53　工程数据传递

Step6： 在 Workbench 16.0 平台的 Project Schematic（工程项目管理窗口）中单击右键，在弹出的图 2-54 所示的快捷菜单中选择 Add to Custom（添加到用户）选项。

Step7： 在弹出的图 2-55 所示的 Add Project Template（添加工程模版）对话框中输入名字为 Maxwell to Icepak for 2 ways Solution 并单击 OK 按钮。

Step8： 完成用户自定义的分析模板添加后，单击 Workbench 16.0 左侧 Toolbox 下面的 Custom System 前面的＋图标，如图 2-56 所示，刚才定义的分析模板已被成功添加到 Custom System 中。

Step9： 选择 Workbench 16.0 平台 File 菜单中的 New 命令，新建立一个空项目工程管理窗口，然后双击 Toolbox 下面的 Custom System→Maxwell to Icepak for 2 ways Solution 模板，此时 Project Schematic 窗口中将出现图 2-57 所示的分析流程。

注：分析流程图表模板建立完成后，要想进行分析还需要添加几何文件及边界条件等，以后章节将一一介绍，这里不再赘述。

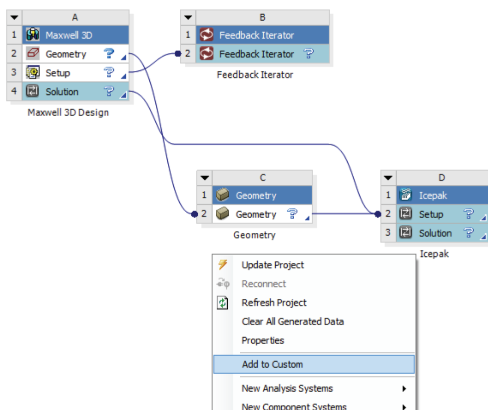


图 2-54 快捷菜单

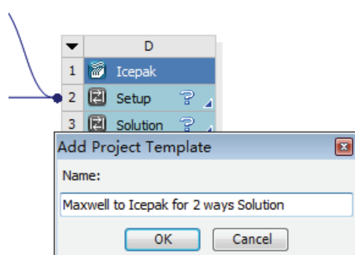


图 2-55 添加模板对话框

注：ANSYS Workbench 安装完成后，系统自动创建了部分用户自定义系统。

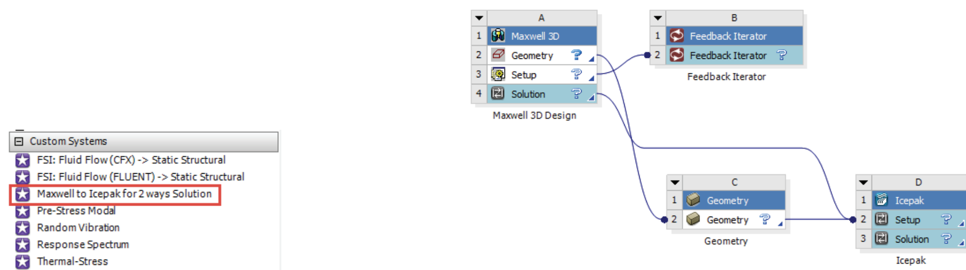


图 2-56 用户定义的分析流程模板

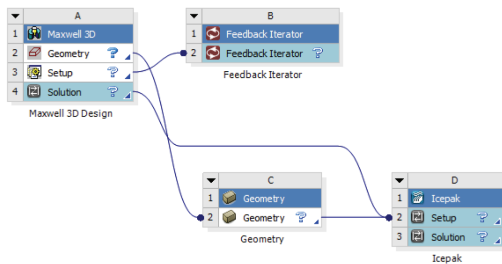


图 2-57 加载自定义模板

2.2 DesignModeler 16.0 几何建模

有限元分析之前，最重要的工作就是几何建模，几何建模的好坏直接影响到计算结果的正确性。一般在整个有限元分析的过程中，几何建模占据了整个过程非常多的时间，同是非常重要的环节。

本节将着重讲述利用 ANSYS Workbench 自带的几何建模工具——DesignModeler 进行几何建模的方法。

2.2.1 DesignModeler 几何建模平台

在 ANSYS Workbench 平台中，依次选择 Toolbox→Component Systems 下面的 Geometry 模块并双击，此时在右侧的 Project Schematic 中出现 Geometry 单元，如图 2-58 所示。

注：在 Analysis Systems 下面双击任意一个模块选项出现的分析流程选项卡中也可以建立 Geometry。

双击 A2（Geometry）进入图 2-59 所示的 DesignModeler 平台界面，如同其他 CAD 软件一样，DesignModeler 平台构成有以下几个关键部分：菜单栏、工具栏、绘图窗口、模型树及命令树、属性详细设置窗口等，在几何建模之前先对常用的命令及菜单进行详细介绍。

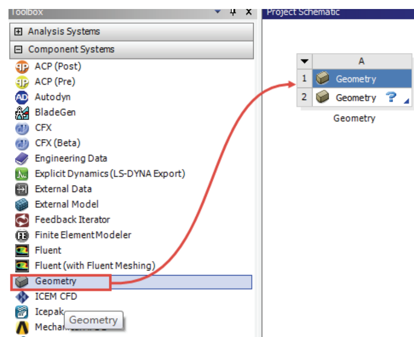


图 2-58　Geometry 创建

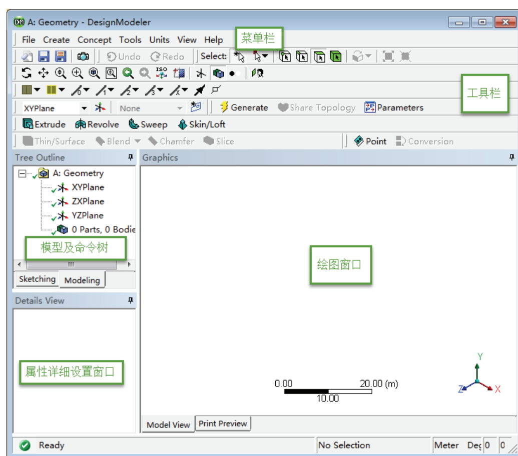


图 2-59　DesignModeler 平台

2.2.2 菜单栏

菜单栏中包括 File（文件）、Create（创建）、Concept（概念）、Tools（工具）、Units（单位）、View（视图）及 Help（帮助）7 个基本菜单。

1．File（文件）菜单

File（文件）菜单中的命令如图 2-60 所示，下面对 File（文件）菜单中的常用命令进行简单介绍。

1）Refresh Input（刷新输入）：当几何数据发生变化时，选择此命令保持几何文件同步。

2）Start Over（新建立一个绘图）：如果当前绘图程序里面有几何模型，将提示是否清理模型并重新启动程序，单击 Yes 按钮，则启动一个新的建模程序，单击 No 按钮，则留在当前界面。

3）Load DesignModeler Database…（载入 DesignModeler 数据文件）：弹出对话框用以加载 DM 建立的几何模型。

4）Save Project（保存工程文件）：选择此命令保存工程文件，如果是新建立未保存的工程文件，Workbench 16.0 平台会提示输入文件名。

5）Export（几何输出）：选择 Export 命令后，DesignModeler 平台会弹出图 2-61 所示的“另存为”对话框，在对话框的保存类型中，读者可以选择喜欢的几何数据类型。

6）Attach to Active CAD Geometry（动态链接开启的 CAD 几何）：选择此命令后，DesignModeler 平台会将当前活动的 CAD 软件中的几何数据模型读入到图形交互窗口中。

注意：在 CAD 中建立的几何文件未保存，DesignModeler 平台无法读取当前处于打开状态 CAD 软件的几何文件模型。

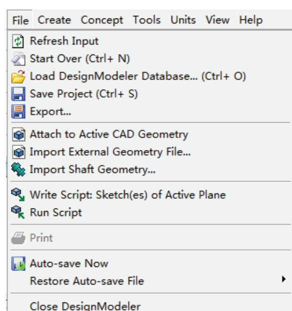


图 2-60　File 菜单

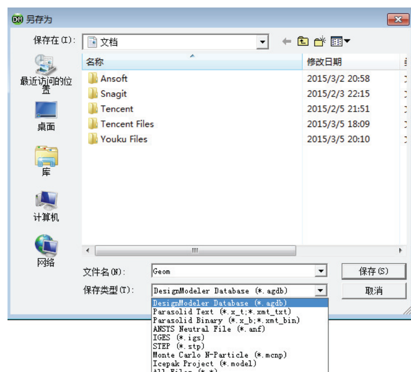


图 2-61　“另存为”对话框

7）Import External Geometry File（导入外部几何文件）：选择此命令，在弹出的图 2-62 所示的“打开”对话框中可以选择所要读取的文件名，此外，DesignModeler 平台支持的所有外部文件格式在“打开”对话框中的“文件类型”中被列出。

8）Import Shaft Geometry…（导入轴几何文件）：导入*.txt 格式的轴类几何文件，文件中的内容以梁单元形式给出，如图 2-63 所示的 shaft.txt 文档中包含以下内容，第一列为转子的分段数，第二列为每段转子的轴向长度，第三列为转子的外直径，第四列为转子的内直径。通过 Import Shaft Geometry…选项将 shaft.txt 导入到 Geometry 平台后，显示截面实体模型后的显示效果如图 2-63 下图所示。

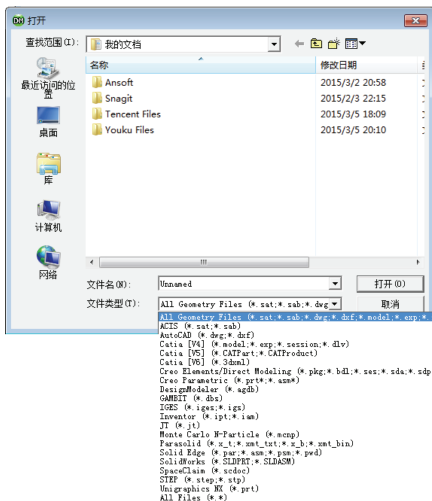


图 2-62　“打开”对话框

shaft.txt - 记事本

Statioin	Length	Outer Diameter	Inner Diameter
1	2.34	1.53	0
2	5.27	0.98	0
3	4.75	2.66	0
4	2.34	3.21	0
5	2.34	3.48	0
6	0.72	3.48	0
7	1.75	2.97	2.05
8	1.03	1.49	0.77
9	5.27	1.49	0
10	4.75	1.78	0
11	2.34	4.80	0



图 2-63　shaft.txt 和转子模型

9）Write Script：Sketch（es）of Active Plane（写脚本）：选择此选项，此时弹出保存脚本文件名对话框，默认格式为*.js（java script），另外还可以选择*.anf（ANSYS Neural File）格式。在 XY 平面上建立一个草绘图形，如正六边形（见图 2-64），建立完成后选择 Write Script：Sketch（es）of Active Plane 选项，并将文件名保存为 script_ex1.js，打开 script_ex1.js 文件后可以查看在 XY 平面上建立的正六边形过程的脚本记录，如图 2-65 所示。

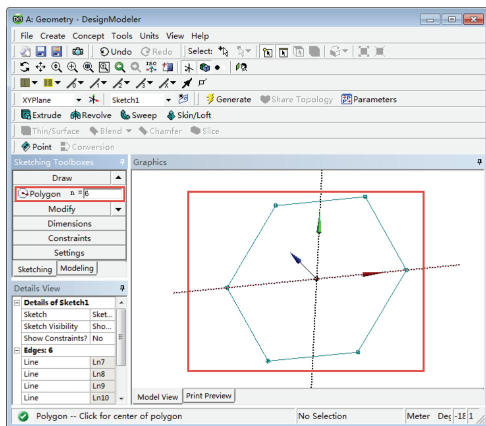


图 2-64　草绘图形

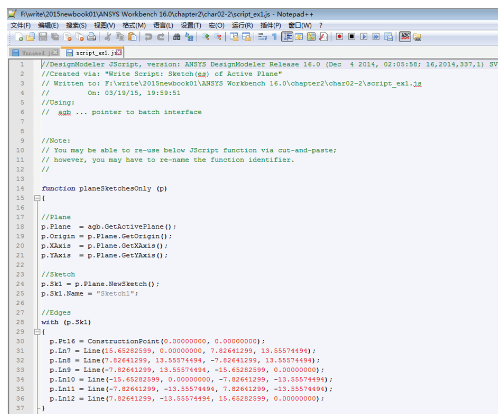


图 2-65　脚本记录

10）Run Script（运行脚本）：选择此选项后，将弹出运行已经保存的脚本文件，如果运行成功，将会读入脚本中的相关操作，如将上例的脚本导入到 Geometry 平台中的操作为：选择 Run Script 选项，在弹出的“打开”对话框中选择 script_ex1.js 文件，单击“打开”按钮后会把正六边形的草绘图形导入到 Geometry 平台中。

注：执行多次 Run Script 命令，Geometry 将会把每一次的 Run Script 都导入到 Geometry 中，所以执行 Run Script 命令时，请读者引起注意。

其余命令这里不再讲述，请读者参考帮助文档的相关内容。

2．Create（创建）菜单

Create（创建）菜单如图 2-66 所示，Create 菜单中包含对实体操作的一系列命令，包括实体拉伸、倒角、放样等操作，下面对 Create（创建）菜单中的实体操作命令进行简单介绍。

1）New Plane（创建新平面）：单击此命令后，会在 Details View 窗口中出现图 2-67 所示的平面设置面板，在 Details of Plane4→Type 中显示了 8 种设置新平面的类型，具体如下。

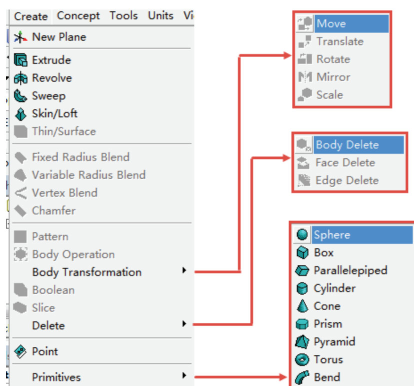


图 2-66　Create 菜单

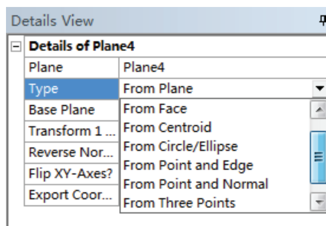


图 2-67　新建平面设置面板

● From Plane（以平面）：从已有的平面中创建新平面。

● From Face（以一个表面）：从已有的表面中创建新平面。
● From Centroid（以几何中心）：从一个已有几何的中心创建新平面。
● From Circle/Ellipse（以圆形/椭圆形）：从已有的圆形或者椭圆形创建新平面。
● From Point and Edge（以一点和一条边）：从已经存在的一条边和一个不在这条边上的点创建新平面。
● From Point and Normal（以一点和法线方向）：从一个已经存在的点和一条边界方向的法线创建新平面。
● From Three Points（以三点）：从已经存在的 3 个点创建一个新平面。
● From Coordinates（以坐标系）：通过设置与坐标系相对位置来创建新平面。

当选择以上 8 种中的任何一种方式来建立新平面时，Type 下面的选项会有所变化，具体请参考帮助文档。

2）Extrude（拉伸）：如图 2-68 所示，本命令可以将二维的平面图形拉伸成三维的立体图形，即对已经草绘完成的二维平面图形沿着二维图形所在平面的法线方向进行拉伸操作。

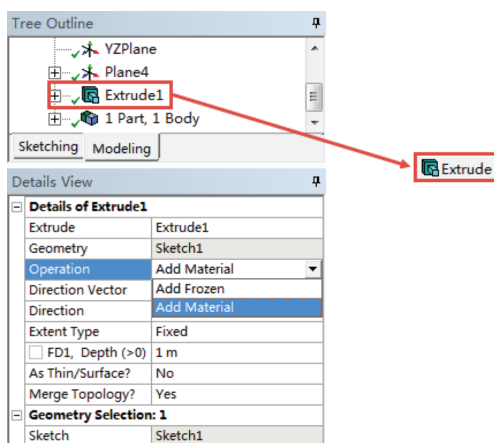


图 2-68　拉伸设置面板

在 Operation 选项中可以选择两种操作方式：
● Add Material（添加材料）：与常规的 CAD 拉伸方式相同，这里不再赘述。
● Add Frozen（添加冻结）：添加冻结零件，后面会提到。

在 Direction 选项中有 4 种拉伸方式可以选择：
● Normal（普通方式）：默认设置的拉伸方式。
● Reversed（相反方向）：此拉伸方式与 Normal 方向相反。
● Both-Symmetric（双向对称）：沿着两个方向同时拉伸指定的拉伸深度。
● Both-Asymmetric（双向非对称）：沿着两个方向同时拉伸指定的拉伸深度，但是两侧的拉伸深度不相同，需要在下面的选项中设定。

在 As Thin/Surface? 选项中选择拉伸是否薄壳拉伸，如果在选项中选择 yes 选项，则需要分别输入薄壳的内壁和外壁厚度。

3）Revolve（旋转）：选择此命令后，将出现图 2-69 所示旋转操作面板。
● 在 Geometry（几何体）中选择需要做旋转操作的二维平面几何图形。

- 在 Axis（旋转轴）中选择二维几何图形旋转所需要的轴线。
- Operation、As Thin/Surface、Merge Topology 选项参考 Extrude 命令相关内容。
- 在 Direction 栏中输入旋转角度。

4）Sweep（扫掠）：选择此命令后，弹出图 2-70 所示的扫掠设置面板。

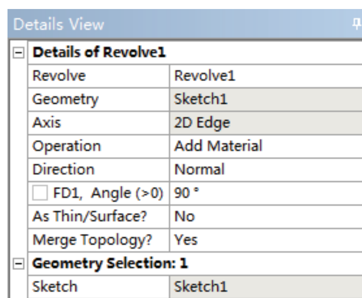


图 2-69　旋转设置面板

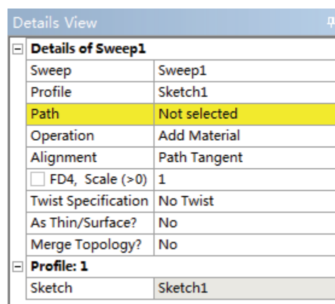


图 2-70　扫掠设置面板

- 在 Profile（截面轮廓）中选择二维几何图形作为要扫掠的对象。
- 在 Path（扫掠路径）中选择直线或者曲线来确定二维几何图形扫掠的路径。
- 在 Alignment（扫掠调整方式）中选择按 Path Tangent（沿着路径切线方向）或者 Global Axes（总体坐标轴）两种方式。
- 在 FD4,Scale（>0）中输入比例因子来扫掠比例。
- 在 Twist Specification（扭曲规则）中选择扭曲的方式：有 No Twist（不扭曲）、Turns（圈数）及 Pitch（螺距）3 种选项。
- No Twist（不扭曲）：即扫掠出来的图形是沿着扫掠路径的。
- Turns（圈数）：在扫掠过程中设置二维几何图形绕扫掠路径旋转的圈数。如果扫掠的路径是闭合环路，则圈数必须是整数；如果扫掠路径是开路，则圈数可以是任意数值。
- Pitch（螺距）：在扫掠过程中设置扫掠的螺距大小。

5）Skin/Loft（蒙皮/放样）：选择此命令后，弹出图 2-71 所示的蒙皮/放样操作面板。

在 Profile Selection Method（轮廓文件选择方式）栏中可以用 Select All Profiles（选择所有轮廓）或者 Select Individual Profiles（选择单个轮廓）两种方式选择二维几何图形。

选择完成后，会在 Profiles 下面出现所选择的所有轮廓几何图形名称。

6）Thin/Surface（抽壳）：选择此命令后，弹出图 2-72 所示的抽壳设置面板：

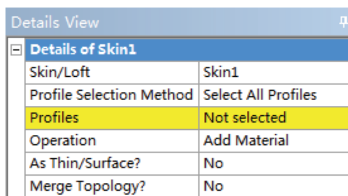


图 2-71　蒙皮/放样操作面板

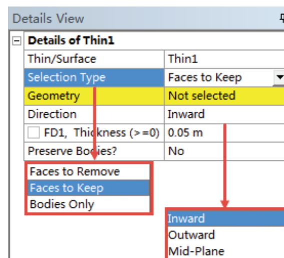


图 2-72　抽壳设置面板

在 Selection Type（选择方式）栏中可以选择以下 3 种方式。

● Faces to Keep（保留面）：选择此选项后，对保留面进行抽壳处理。

● Faces to Remove（去除面）：选择此选项后，对选中面进行去除操作。

● Bodies Only（仅体）：选择此选项后，将对选中的实体进行抽空处理。

在 Direction（方向）栏中可以通过以下 3 种方式对抽壳进行操作。

● Inward（内部壁面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行壁面向内部抽壳处理。

● Outward（外部壁面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行壁面向外部抽壳处理。

● Mid-Plane（中间面）：选择此选项后，抽壳操作对实体进行中间壁面抽壳处理。

7）Fixed Radius Blend（确定圆角半径）：选择此命令，弹出图 2-73 所示的圆角设置面板。

在 FD1，Radius（>0）栏中输入圆角的半径。

在 Geometry 栏中选择要圆角的棱边或者平面，如果选择的是平面，圆角命令将平面周围的几条棱边全部进行圆角处理。

8）Variable Radius Blend（变化半径圆角）：选择此命令，弹出图 2-74 所示的圆角设置面板。

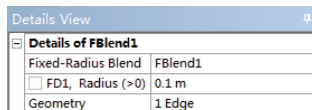


图 2-73 确定半径倒圆角设置面板

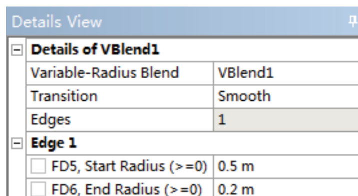


图 2-74 变化半径圆角设置面板

● 在 Transition（过渡）选项栏中可以选择 Smooth（平滑）和 Linear（线性）两种。

● 在 Edges（棱边）选项中选择要倒角的棱边。

● 在 Start Radius（>=0）栏中输入初始半径大小。

● 在 End Radius（>=0）栏中输入尾部半径大小。

9）Chamfer（倒角）：选择此命令会弹出的图 2-75 所示的倒角设置面板。

在 Geometry 栏中选择实体棱边或者表面，当选择表面时，将表面周围的所有棱边全部倒角。

在 Type（类型）栏中有以下 3 种数值输入方式。

● Left-Right（左-右）：选择此选项后，在下面的栏中输入两侧的长度。

● Left-Angle（左-角度）：选择此选项后，在下面的栏中输入左侧长度和一个角度。

● Right-Angle（右-角度）：选择此选项后，在下面的栏中输入右侧长度和一个角度。

10）Pattern（阵列）：选择此命令会弹出的图 2-76 所示的阵列设置面板。

在 Pattern Type（阵列类型）栏中可以选择以下 3 种阵列样式。

● Linear（线性）：选择此选项后，阵列的方式为沿着某一方向阵列，需要在 Direction（方向）栏中选择要阵列的方向及偏移距离和阵列数量。

● Circular（圆形）：选择此选项后，阵列的方式为沿着某根轴线阵列一圈，需要在 Axis（轴线）栏中选择轴线及偏移距离和阵列数量。

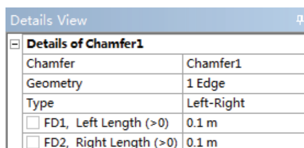


图 2-75　倒角设置面板

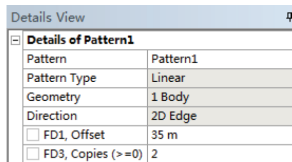


图 2-76　阵列设置面板

Rectangular（矩形）：选择此选项后，阵列方式将沿着两根相互垂直的边或者轴线阵列，需要选择两个阵列方向及偏移距离和阵列数量。

11）Body Operation（体操作）：选择此命令会弹出图 2-77 所示的体操作设置面板。

在 Type（类型）栏中有以下几种体操作样式。

- Mirror（镜像）：对选中的体进行镜像操作，选择此命令后，需要在 Bodies（体）栏中选择要镜像的体，在 Mirror Plane（镜像平面）栏中选择一个平面，如 XYPlane 等。
- Move（移动）：对选中的体进行移动操作，选择此命令后，需要在 Bodies（体）栏中选择要镜像的体，在 Source Plane（源平面）栏中选择一个平面作为初始平面，如 XYPlane 等；在 Destination Plane（目标平面）栏中选择一个平面作为目标平面，两个平面可以不平行，本操作主要应用于多个零件的装配。
- Delete（删除）：对选中平面进行删除操作。
- Scale（缩放）：对选中实体进行等比例放大或者缩小操作，选中此命令后，在 Scaling Origin（缩放原点）栏中可以选择 World Origin（全局坐标系原点）、Body Centroids（实体的质心）及 Point（点）3 个选项；在 FD1,Scaling Factor（>0）栏中输入缩放比例。
- Sew（缝合）：对有缺陷的体进行补片复原后，再利用缝合命令对复原部位进行实体化操作。
- Simplify（简化）：对选中材料进行简化操作。
- Cut Material（切材料）：对选中的体进行去除材料操作。
- Imprint Faces（表面印记）：对选中体进行表面印记操作。
- Slice Material（材料切片）：需要在一个完全冻结的体上执行操作，对选中材料进行材料切片操作。
- Clean Body（清除体）：对选中实体进行清除操作。
- Convert to NURBS（转化成 NURBS 曲线）：对选中实体进行实体转化操作。

12）Boolean（布尔运算）：选择此命令会弹出图 2-78 所示的布尔运算设置面板。

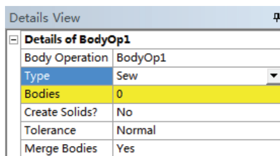


图 2-77　体操作设置面板

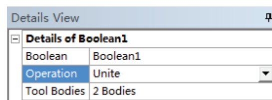


图 2-78　布尔运算设置面板

在 Operation（操作）选项中有以下 4 种操作选项。

- Unit（并集）：将多个实体合并到一起，形成一个实体，此操作需要在 Tools Bodies

（工具体）栏中选中所有进行体合并的实体。

- Subtract（差集）：用一个实体（Tools Bodies）从另一个实体（Target Bodies）中去除。需要在 Target Bodies（目标体）中选择所要切除材料的实体，在 Tools Bodies（工具体）栏中选择要切出的实体工具。
- Intersect（交集）：将两个实体相交部分取出来，其余的实体被删除。
- Imprint Faces（表面印记）：生成一个实体（Tools Bodies）与另一个实体（Target Bodies）相交处的面；需要在 Target Bodies（目标体）和 Tools Bodies（工具体）栏中分别选择两个实体。

13）Slice（切片）：增强了 DesignModeler 的可用性，可以产生用来划分映射网格的可扫掠分网的体。当模型完全由冻结体组成时，本命令才可用。选择此命令会弹出图 2-79 所示的切片设置面板。

在 Slice Type（切片类型）选项中有以下几种方式对体进行切片操作。

- Slice by Plane（用平面切片）：利用已有的平面对实体进行切片操作，平面必须经过实体，在 Base Plane（基准平面）栏中选择平面。
- Slice off Faces（用表面偏移平面切片）：在模型上选中一些面，这些面大概形成一定的凹面，本命令将切开这些面。
- Slice by Surface（用曲面切片）：利用已有的曲面对实体进行切片操作，在 Target Face（目标面）栏中选择曲面。
- Slice off Edges（用边做切片）：选择切分边，用切分出的边创建分离体。
- Slice By Edge Loop（用封闭棱边切片）：在实体模型上选择一条封闭的棱边来创建切片。

14）Delete（删除）：包含删除体、删除面和删除线 3 个子选项。本命令用来“撤销”倒角和去材料等操作的，可以将倒角、去材料等特征从体上移除。选择此命令会弹出图 2-80 所示的删除面设置面板。

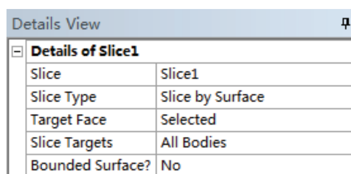


图 2-79　切片设置面板

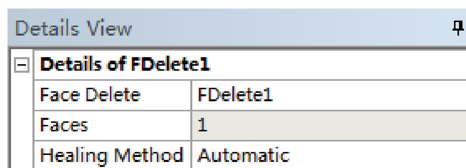


图 2-80　删除面设置面板

在 Healing Method（处理方式）栏中有以下几种方式来实现删除面的操作。

- Automatic（自动）：选择本命令后，在 Face 栏中选择要去除的面，即可将面删除。
- Natural Healing（自然处理）：对几何体进行自然复原处理。
- Patch Healing（修补处理）：对几何实体进行修补处理。
- No Healing（不处理）：不进行任何修复处理。

15）Primitives（原始图形）：通过此命令可以创建一些简单的基本的图形，如球、箱体、圆柱及金字塔等。

- Sphere（球）：选择 Sphere 选项后在下面的 Details View 详细设置属性框中出现图 2-81 所示的球参数详细设置面板，在面板中设置：球心 3 个方向的坐标值、球的半径，

如果是空心球还需要设置球的厚度等。

Box（箱体）：选择 Box 选项后在下面的 Details View 详细设置属性框中出现图 2-82 所示的箱本参数详细设置窗口，在窗口中设置：箱体第一点坐标值、对角线在 3 个方向的坐标值（或者第二点坐标值）及是否创建为薄壁零件等参数。

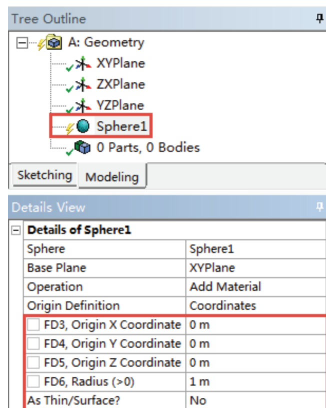


图 2-81　球参数详细设置面板

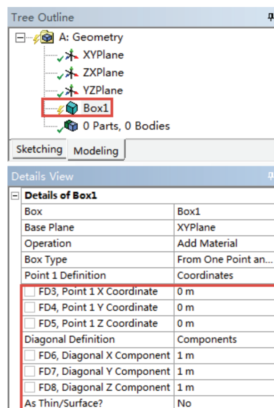


图 2-82　箱体参数详细设置面板

- Parallelepiped（平行六面体）：如图 2-83 所示，通过输入原始坐标和 3 个方向的坐标建立平行六面体。
- Cylinder（圆柱体）：如图 2-84 所示，通过输入原始坐标、轴向坐标及半径来建立圆柱体。

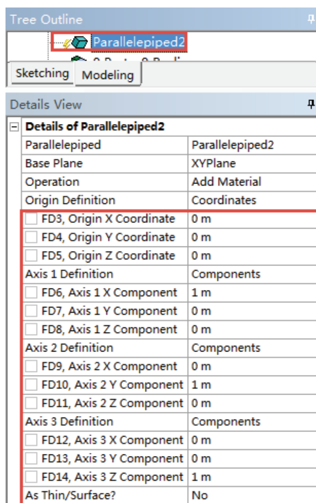


图 2-83　平行六面体参数

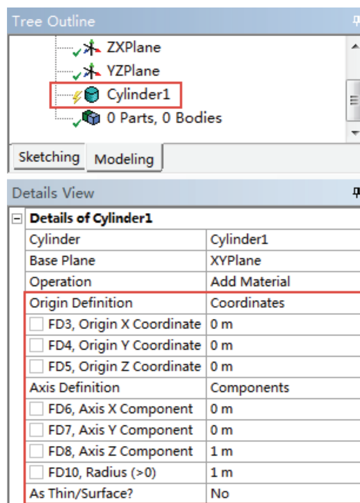


图 2-84　圆柱体参数

- 图 2-85 所示为 Concept（概念）菜单，Concept 菜单中包含对线体和面操作的一系列命令，包括线体的生成与面的生成等。
- 图 2-86 所示为 Tools（工具）菜单，Tools 菜单中包含对线、体和面操作的一系列命令，包括冻结、解冻、选择命名、属性、包含和填充等命令。

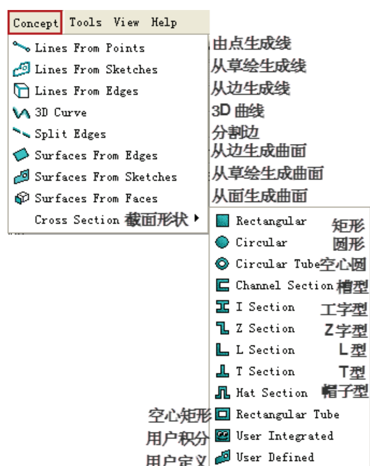


图 2-85　Concept 菜单



图 2-86　Tools 菜单

下面对一些常用的工具命令进行简单介绍。

1）Freeze（冻结）：DM 平台会默认将新建立的几何体和已有的几何体合并起来保持单个体，如果想将新建立的几何体与已有的几何体分开，需要将已有的几何体进行冻结处理。

冻结特征可以将所有的激活体转到冻结状态，但是在建模过程中除切片操作以外，其他命令都不能用于冻结体。

2）Unfreeze（解冻）：冻结的几何体可以通过本命令解冻。

3）Named Selection（选择命名）：用于对几何体中的节点、边线、面、体等进行命名。

4）Mid-Surface（中间面）：用于将等厚度的薄壁类结构简化成“壳”模型。

5）Enclosure（包含）：在体附近创建周围区域以方便模拟场区域，本操作主要应用于流体动力学（CFD）及电磁场有限元分析（EMAG）等计算的前处理，通过 Enclose 操作可以创建物体的外部流场或者绕组的电场或磁场计算域模型。

6）Fill（填充）：与 Enclosure（包含）命令相似，Fill 命令主要为几何体创建内部计算域，如管道中的流场等。

- 图 2-87 所示为 View（视图）菜单，视图菜单各个命令主要对几何体显示的操作，这里不再赘述。
- 图 2-88 所示为 Help（帮助）菜单，帮助菜单提供了在线帮助等。

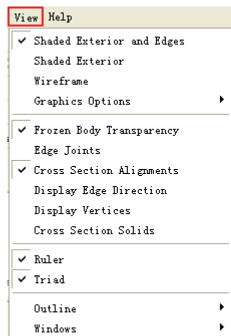


图 2-87　View 菜单

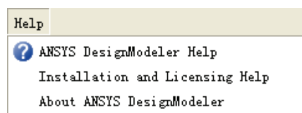


图 2-88　Help 菜单

2.2.3 工具栏

图 2-89 所示为 DesignModeler 平台默认的常用工具命令，这些命令在菜单栏中均可找到，下面对建模过程中经常用到的命令进行介绍。

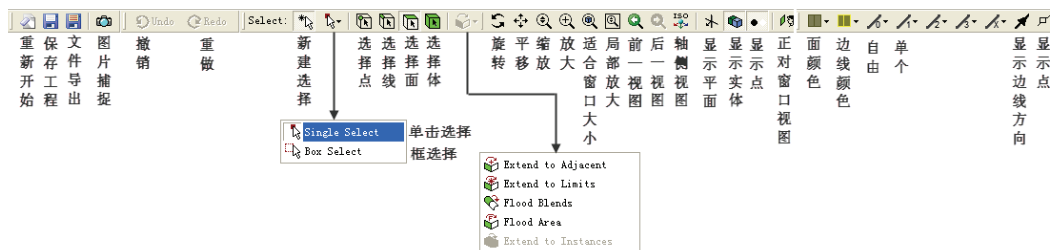


图 2-89 工具栏

以三键鼠标为例，鼠标左键实现基本控制，包括几何的选择和拖动，此外与键盘部分按钮结合使用实现不同操作；

- 〈Ctrl〉+鼠标左键：执行添加/移除选定几何实体。
- 〈Shift〉+鼠标中键：执行放大/缩小几何实体操作。
- 〈Ctrl〉+鼠标中键：执行几何体平移操作。

另外，按住鼠标右键进行框选几何实体，可以实现几何实体的快速缩放操作，在绘图区域单击鼠标右键可以弹出快捷菜单，以完成相关的操作，如图 2-90 所示。

1. 选择过滤器

在建模过程中，会经常需要选择实体的某个面、某个边或者某个点等操作，可以在工具栏中相应的过滤器中进行选择切换，如图 2-91 所示，如果想选择齿轮上的某个齿的面，首先单击工具栏中的 按钮使其处于凹陷状态，然后选择所关心的面即可。如果想要选择线或者点，则只需选中工具栏中的 或者 按钮，然后点选所关心的线或者点即可。

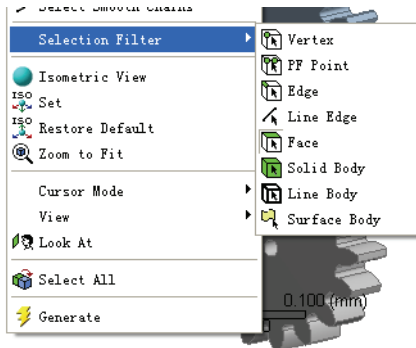


图 2-90 快捷菜单

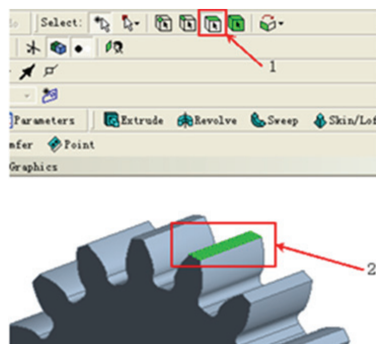


图 2-91 面选择过滤器

如果需要对多个面进行选择，如图 2-92 所示，则需要单击工具栏中 按钮，在弹出的菜单中选择 Box Select 命令，然后单击 按钮，在绘图区域中框选所关心的面即可。

线或者点的框选与面类似，这里不再赘述。

框选的时候有方向性，具体说明如下。

- 鼠标从左到右拖动：选中所有完全包含在选择中的对象。
- 鼠标从右到左拖动：选中包含于或经过选择框的对象。

利用鼠标还能直接对几何模型进行控制。

2. 窗口控制

DesignModeler 平台的工具栏上面有各种控制窗口的快捷按钮，通过单击不同按钮，实现图形控制，如图 2-93 所示。

- 按钮用来实现几何旋转操作。
- 按钮用来实现几何平移操作。
- 按钮实现图形的放大缩小操作。
- 按钮实现窗口的缩放操作。
- 按钮实现自动匹配窗口大小操作。

利用鼠标还能直接在绘图区域控制图形，如图 2-93 所示。当鼠标位于图形的中心区域相当于操作，当鼠标位于图形之外时为绕 Z 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的上下边界附近时为绕 X 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的左右边界附近时为绕 Y 轴旋转操作。

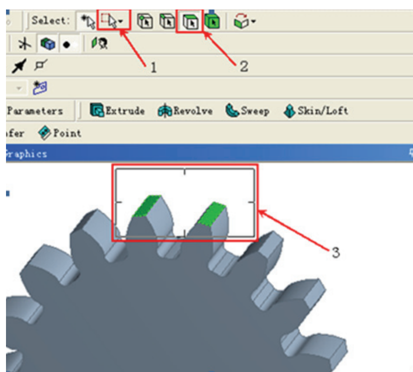


图 2-92 面框选过滤器

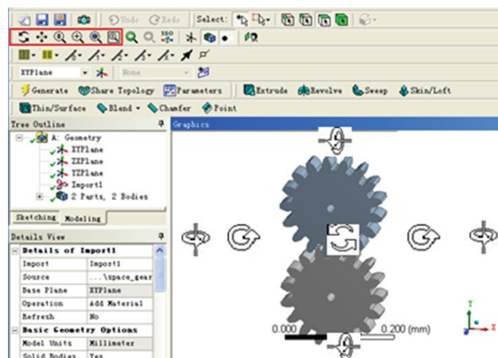


图 2-93 窗口控制

2.2.4 常用命令栏

图 2-94 所示为 DesignModeler 平台默认的常用命令，这些命令在菜单栏中均可找到，这里不再赘述。



图 2-94 常用命令栏

2.2.5 Tree Outline（模型树）

图 2-95 所示的模型树中包括两个模块：Modeling（实体模型）和 Sketching（草绘），下



面对 Sketching（草绘）模块中的命令进行详细介绍。

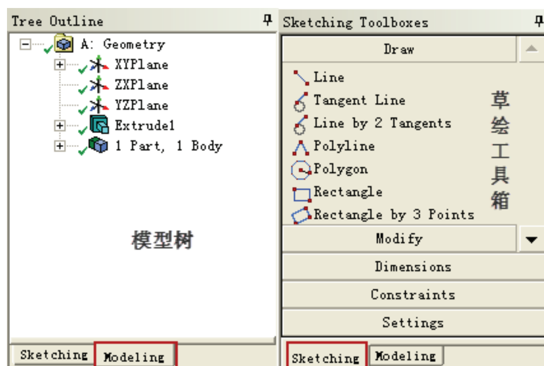


图 2-95　Tree Outline

Sketching（草绘）模块主要由以下几个部分组成。

- Draw（草绘）：图 2-96 所示为 Draw（草绘）卷帘菜单，菜单中包括了二维草绘需要的所有工具，如直线、圆、矩形、椭圆等，操作方法与其他 CAD 软件一样。
- Modify（修改）：图 2-97 所示为 Modify（修改）卷帘菜单，菜单中包括了二维草绘修改需要的所有工具，如圆角、倒角、裁剪、延伸、分割等，操作方法与其他 CAD 软件一样。



图 2-96　Draw 卷帘菜单



图 2-97　Modify 卷帘菜单

- Dimensions（尺寸标注）：图 2-98 所示为 Dimensions（尺寸标注）卷帘菜单，菜单中包括了二维图形尺寸标注需要的所有工具，如一般、水平标注、垂直标注、长度/距离标注、半径直径标注、角度标注等，操作方法与其他 CAD 软件一样。
- Constraints（约束）：图 2-99 所示为 Constraints（约束）卷帘菜单，菜单中包括了二维图形约束需要的所有工具，如固定、水平约束、竖直约束、垂直约束、相切约束、对称约束、平行约束同心约束、等半径约束、等长度约束等，操作方法与其他 CAD 软件一样。
- Settings（设置）：图 2-100 所示为 Settings（设置）卷帘菜单，Settings（设置）菜单主要完成草绘界面的栅格大小及移动捕捉步大小的设置任务。



图 2-98 Dimensions 卷帘菜单



图 2-99 Constraints 卷帘菜单

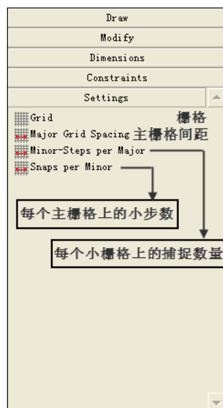


图 2-100 Settings 卷帘菜单

1）在 Settings（设置）菜单下选择 Grid 命令，使 Grid 图标处于凹陷状态，同时在后面生成 Show in 2D：□和 Snap：□，勾选使其处于选中状态 Show in 2D: ☑ Snap: ☑，此时用户交互窗口出现图 2-101 所示的栅格。

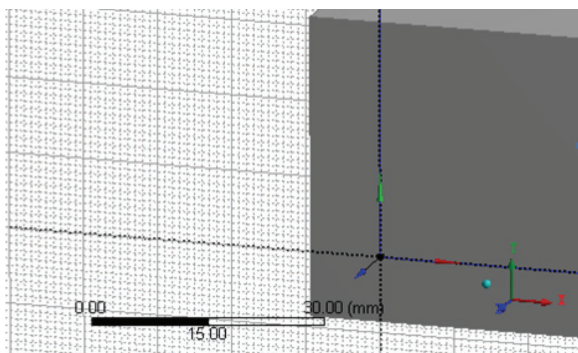


图 2-101 Grid 栅格

2）在 Settings（设置）菜单下选择 Major Grid Spacing 命令，使 Major Grid Spacing 图标处于凹陷状态同时在后面生成 10 mm ，在此文本框中输入主栅格的大小，默认为 10mm，将此值改成 20mm 后在用户交互窗口出现图 2-102 右侧所示的栅格。

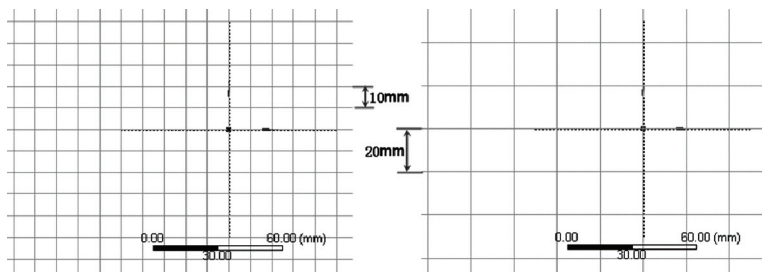


图 2-102 主栅格大小

3）在 Settings（设置）菜单下选择 Minor-Steps per Major 命令，使 Minor-Steps per

Major 图标处于凹陷状态同时在后面生成[10]，在此文本框中输入每个主栅格上划分的网格数，默认为 10，将此值改成 15 后在用户交互窗口出现图 2-103 右侧所示的栅格。

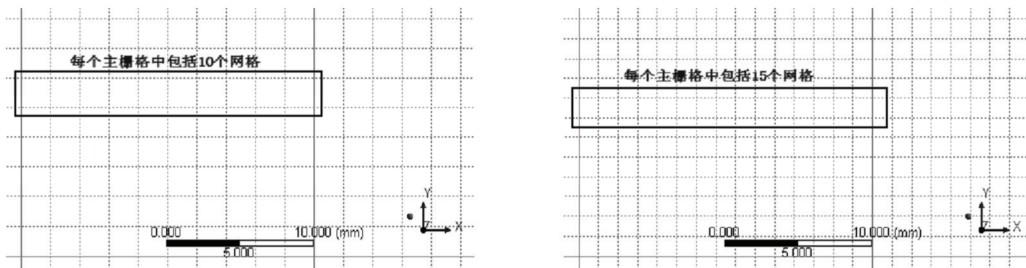


图 2-103　主栅格中小网格数量设置

4）在 Settings（设置）菜单下选择 Snaps per Minor 命令，使 Snaps per Minor 图标处于凹陷状态，同时在后面生成[1]，在此文本框中输入每个小网格上捕捉的次数，默认为 1，将此值改成 2 后，选择草绘直线命令，在用户交互窗口中单击直线第一点，然后移动鼠标，此时吸盘会在每个小网格 4 条边的中间位置被吸一次，如果值是默认的 1，则在 4 个角点被吸住。

前面几节简单介绍了 DesignModeler 平台截面进行简单介绍，本节开始将利用上述工具对稍复杂的几何模型进行建模。

2.2.6 DesignModeler 几何建模实例——连接板

本实例将创建一个图 2-104 所示的连接板模型，在模型的建立过程中使用了拉伸、去材料创建平面、投影及冻结实体等命令。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter02\char02-1\post.wbpj

Step1：启动 Workbench 16 软件后，新创建一个项目 A。然后在项目 A 的 A2 Geometry 中单击鼠标右键，选择 New DesignModeler Geometry 命令，如图 2-105 所示。

Step2：启动 DesignModeler 平台，选择 Units 菜单下面的 Millimeter，确定绘图单位为 mm。

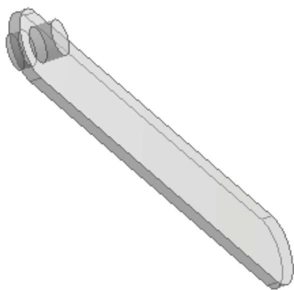


图 2-104　模型

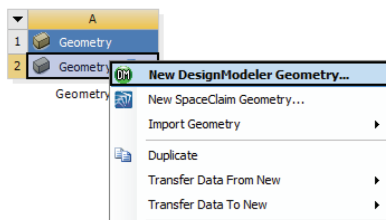


图 2-105　启动 DM

Step3： 单击 Tree Outline 中 A:Geometry→XYPlane 坐标，如图 2-106 所示，然后单击图标，这时草绘平面将自动旋转到正对着平面。

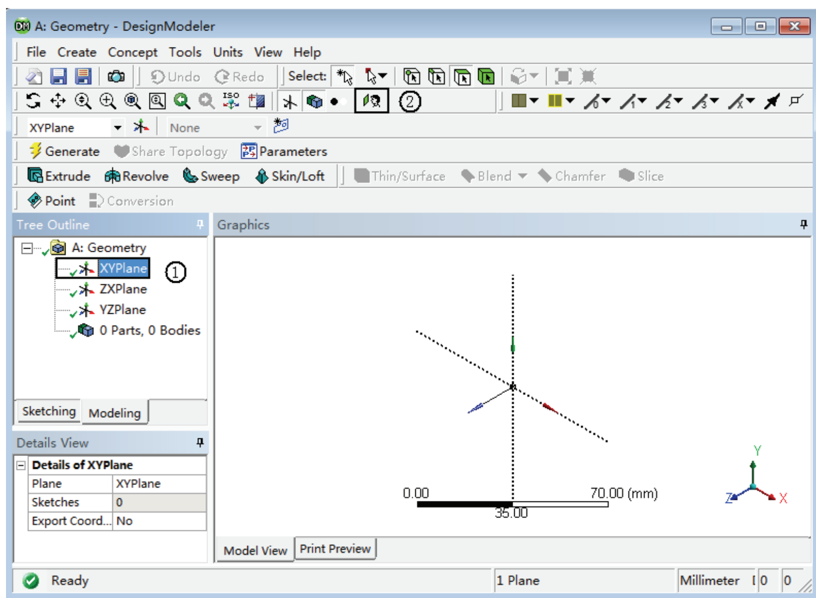


图 2-106 草绘平面

Step4： 切换到 Sketching 草绘模式后，选择 Draw→Oval 命令，在绘图区域绘制图 2-107 所示的两端圆角的鹅卵型，鹅卵型的中心在坐标原点上。

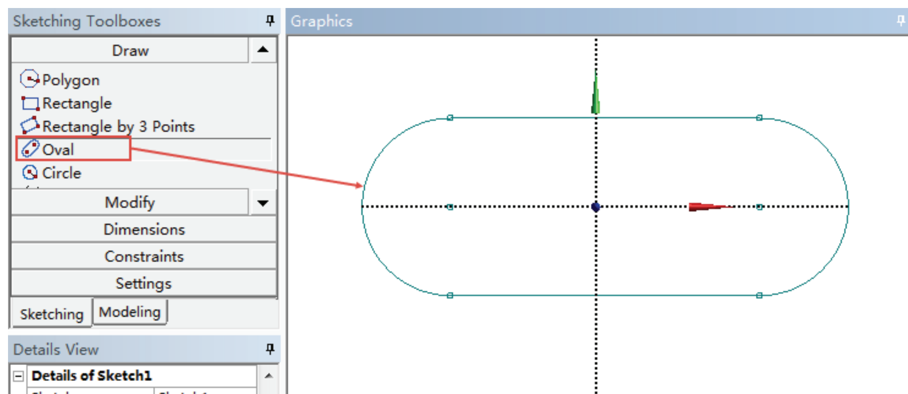


图 2-107 绘制鹅卵型

Step5： 选择 Dimensions→General 命令，然后单击图 2-108 所示标注，标注其长度，在 Details View 面板中的 Dimensions：3 中做如下输入：

H2 栏中输入 100mm，R1 栏中输入 15mm，H3 栏中输入 200mm，并按〈Enter〉键确定。

使用 General 工具进行标注时，除了能对长度进行标注外，还可以对距离、半径等尺寸进行智能标注，另外也可以使用 Horizontal 对水平方向尺寸进行标注，使用 Vertical 对竖直

方向尺寸标注，使用 Radius 对圆形进行半径标注。

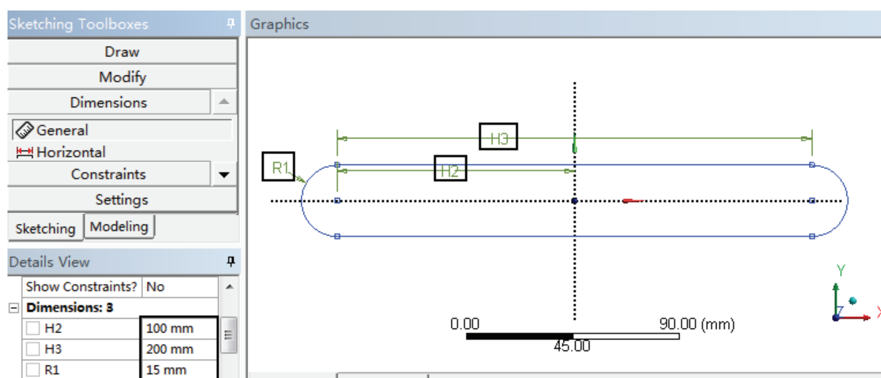


图 2-108　标注设置

Step6： 切换到 Modeling 模式下，在工具栏中单击 Extrude 按钮，如图 2-109 所示，在下面出现的 Details View 面板中做如下设置。

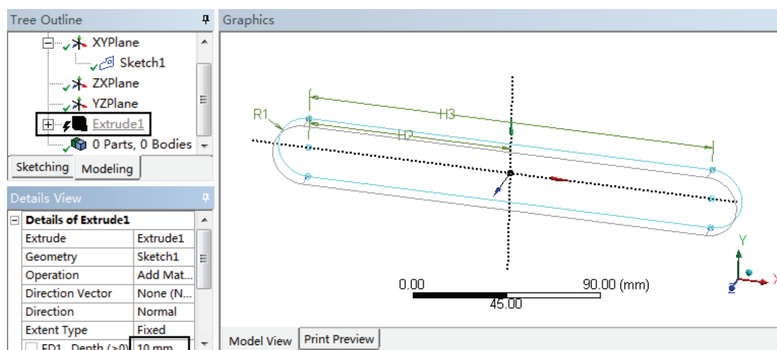


图 2-109　拉伸

在 Geometry 栏中确保 Sketch1 被选中。

在 FD1,Depth(>0)栏中输入 10mm 并按 Generate 确定拉伸。

Step7： 单击工具栏中的按钮关闭草绘平面，如图 2-110 所示。

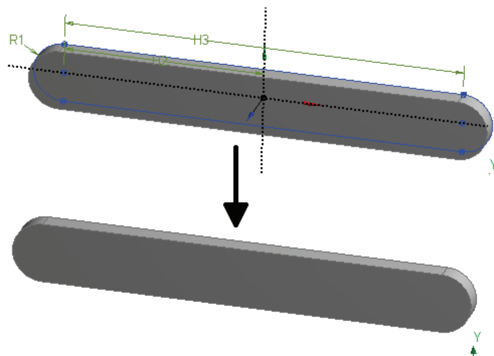


图 2-110　模型平面显示切换

Step8： 创建圆柱。在工具栏中单击按钮，接着单击图 2-111 所示的平面，并使其处于加亮状态。然后单击工具栏中的按钮，使加亮平面正对屏幕。

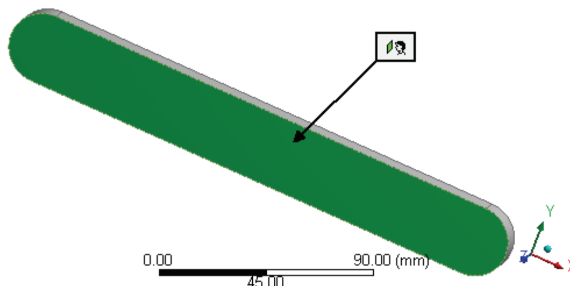


图 2-111　确定草绘平面

Step9： 切换到 Sketching 草绘模式后，选择 Draw→Circle 命令，在绘图区域绘制图 2-112 所示的圆，然后对圆进行标注，在 Details View 面板中进行如下输入。

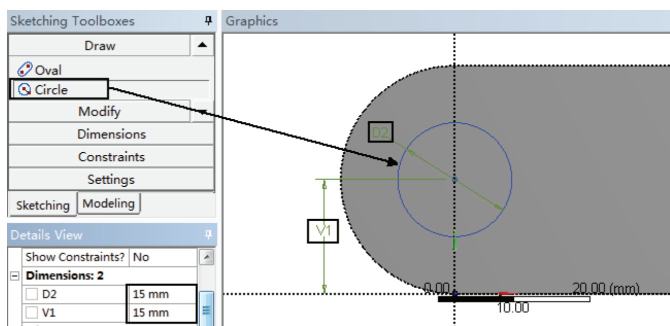


图 2-112　创建圆

在 D2 栏中输入 15mm，在 V1 栏中输入 15mm，并按〈Enter〉键确认。

Step10： 单击工具栏中的Extrude按钮，如图 2-113 所示，在 Details View 面板中做如下设置：

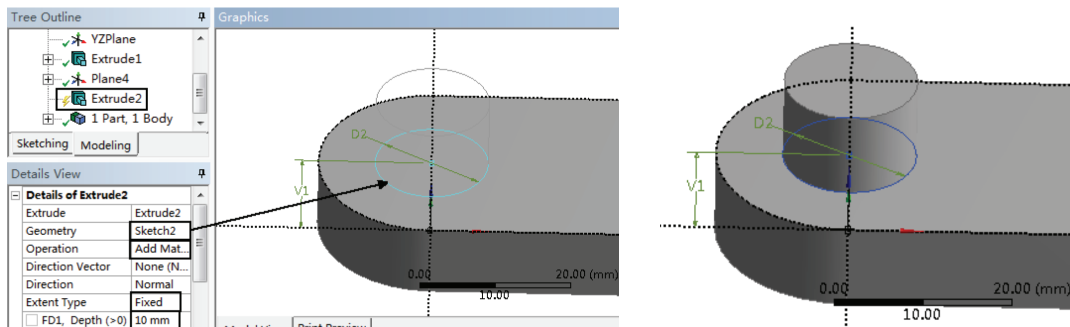


图 2-113　创建孔

在 Geometry 栏中确保 Sketch2 被选中。

在 Operation 栏中选择 Add Material 选项。

在 Extent Type 栏中选择 Fixed 选项。

在 FD1，Depth（>0）栏中输入 10mm。

选择图示的加亮面，此时 Target Faces 栏中会显示数字 1，表面已有一个面被选中，其余选项默认即可，单击工具栏中的 Generate 按钮，完成孔的创建。

Step11：创建对称平面。单击工具栏中的 按钮，在图 2-114 所示的 Details View 面板中做如下设置。

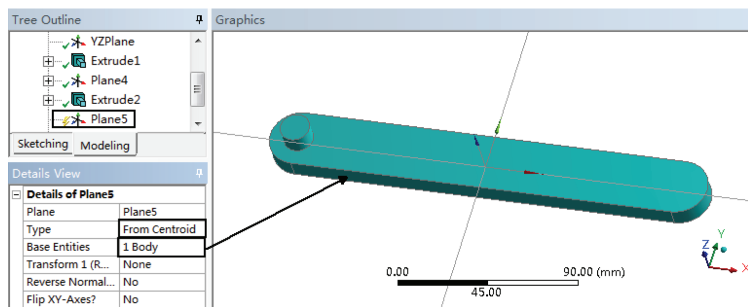


图 2-114　创建平面

在 Type 栏中选择 From Centroid 选项。

在 Base Entities 栏中确保实体被选中。

其余选项保持默认即可，单击工具栏中的 Generate 按钮生成平面。

Step12：实体投影。右键选择 Plane5，在图 2-115 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Sketch Projection 命令。

Step13：在弹出的图 2-116 所示的 Details View 面板中做如下设置。

在 Geometry 栏中确保一侧的半圆柱面被选中，单击 Generate 按钮，此时在 Plane5 平面上创建了一个投影草绘，如图 2-117 所示。

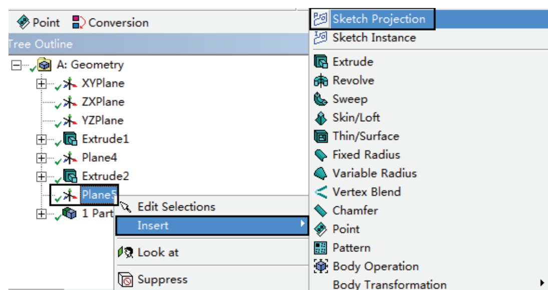


图 2-115　快捷菜单

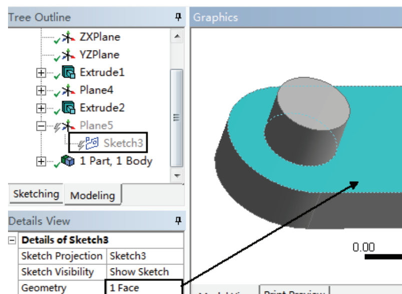


图 2-116　Details View 面板

Step14：切割实体。单击工具栏中的 Extrude 按钮，在图 2-118 所示的 Details View 面板中做如下设置。

在 Geometry 栏中确保 Sketch3 被选中。

在 Operation 栏中选择 Cut Material 选项。

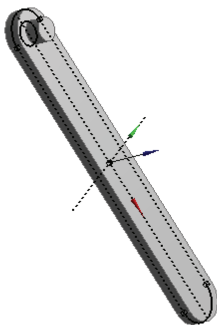


图 2-117 投影草绘

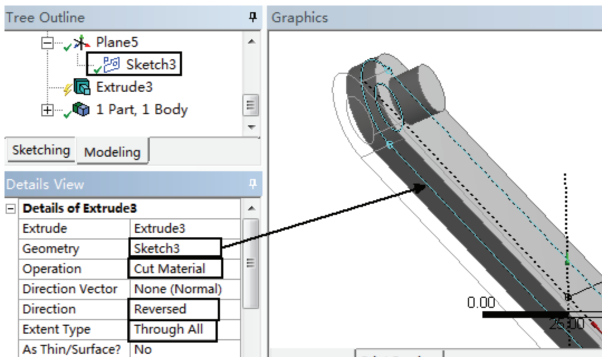


图 2-118 去材料

在 Direction 栏选择 Reversed 选项。

在 Extent Type 栏中选择 Through All 选项。

其余选项默认即可，然后单击工具栏中的 Generate 按钮，生成去材料命令。

Step15： 冻结实体。选择 Tree Outline 中的 1Part，1Body 下面的 Solid，然后依次选择菜单 Tools 中的 Freeze 子菜单，如图 2-119 所示。此时几何实体变成透明状，如图 2-120 所示。

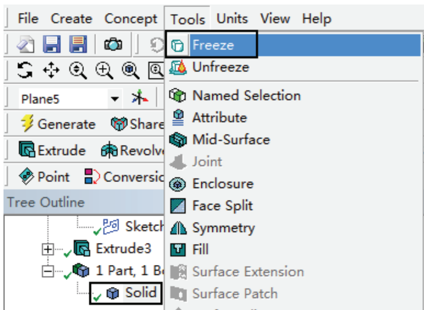


图 2-119 冻结设置

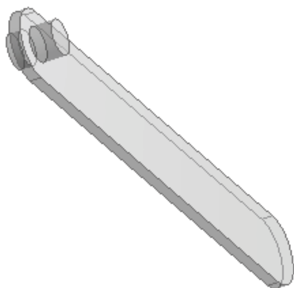


图 2-120 冻结

Step16： 单击工具栏中的按钮，在弹出的保存对话框中输入 post。欲关闭 DesignModeler 程序，单击右上角的按钮即可。

DesignModeler 除了能对几何体进行建模外，还能对多个几何进行装配操作，由于篇幅限制，本实例简单介绍了 DM 平台的几何建模的基本方法，并未对复杂几何进行讲解，请读者根据以上操作及 ANSYS 帮助文档进行学习。

2.2.7 ANSYS SpaceClaim 同步几何建模实例——连接板

本实例将创建一个图 2-121 所示的连接板模型，在模型的建立过程中除了有简单的拉伸和取材料命令的使用外，还对沿曲线进行扫描进行简单介绍。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter02\char02-2\pedestor.wbpj



Step1：启动 Workbench 16.0 软件后，新创建一个项目 A。然后在项目 A 的 A2 Geometry 中单击鼠标右键，选择 New SpaceClaim Geometry 命令，如图 2-122 所示。

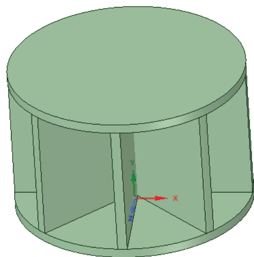


图 2-121　几何模型

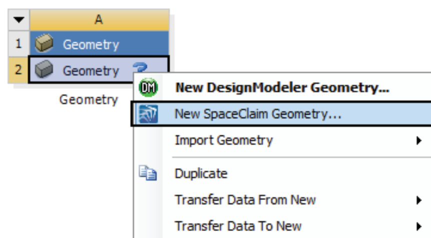


图 2-122　快捷菜单

Step2：启动 SpaceClaim 平台，启动如图 2-123 所示的几何创建平台。

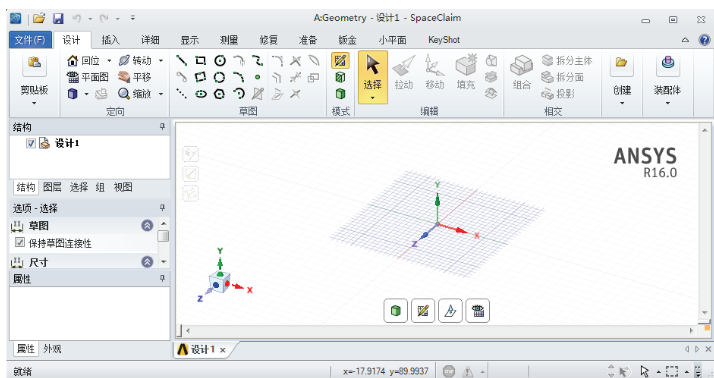


图 2-123　启动几何创建平台

Step3：选择工具栏中的“设计”选项卡，在“设计”选项卡中单击平面图图标，将绘图平面切换到屏幕，如图 2-124 所示。

Step4：选择工具栏中的“设计”选项卡，在“设计”选项卡中单击图标，在坐标原点绘制一个半径为 500mm 的圆，如图 2-125 所示。

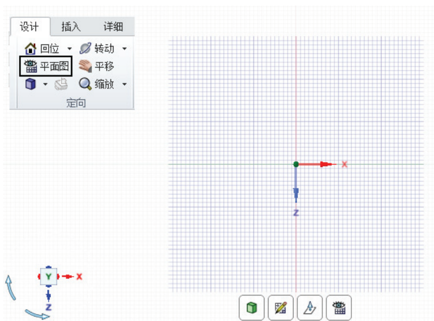


图 2-124　绘图平面

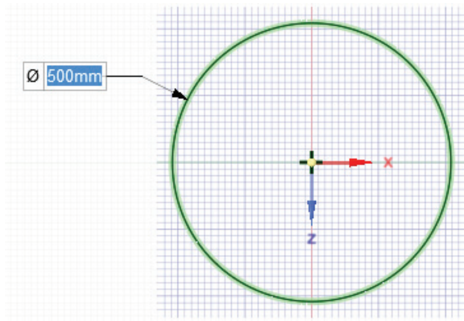


图 2-125　创建圆

Step5：选择工具栏中的“设计”选项卡，在“设计”选项卡中单击图标，此时圆变成了圆面，如图 2-126 所示。

Step6：鼠标左键单击圆面中的任何一个位置不放，然后往上推动鼠标，此时圆面将被拉伸称实体，如图 2-127 所示。

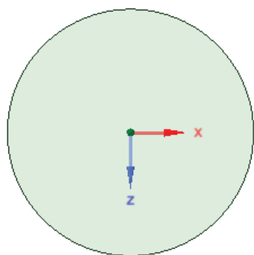


图 2-126 圆面

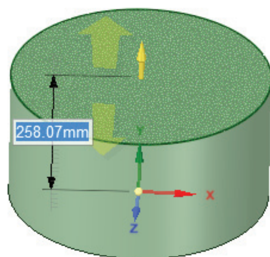


图 2-127 拉伸圆面

Step7：在自动弹出的输入框中输入拉伸厚度为 20mm，如图 2-128 所示，此时完成了圆盘的创建。

Step8：选择工具栏中的“设计”选项卡，在“设计”选项卡中单击 图标，在坐标原点绘制一个点，如图 2-129 所示。

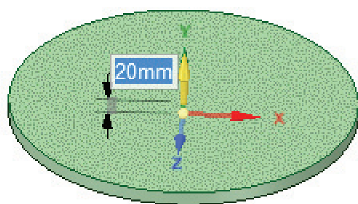


图 2-128 生成圆盘

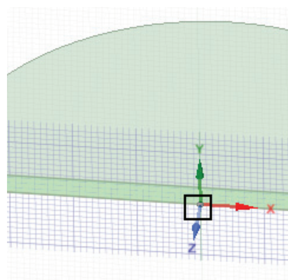


图 2-129 创建点

Step9：选择“设计”选项卡中的“拉伸”命令，然后选择刚才创建的点不放，并滑动鼠标，如图 2-130 所示，此时将从点创建一条直线，输入拉伸长度为 300mm。

Step10：单击刚创建的直线不放，滑动鼠标，并在拉伸的长度中输入 250mm，如图 2-131 所示。

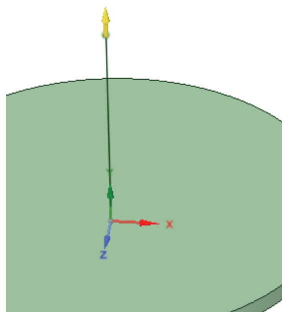


图 2-130 点拉伸成线

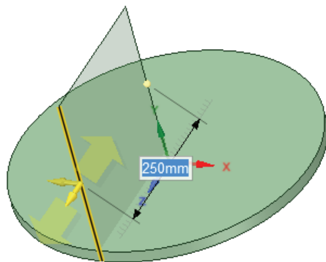


图 2-131 线拉伸成面

Step11：选择设计选项卡中的“拉伸”命令，然后选择刚才创建的面不放，并选中左侧工具栏中的 按钮进行双面拉伸，滑动鼠标并输入厚度为 20mm，如图 2-132 所示。

Step12：单击工具栏中的拆分主体按钮，然后先选中几何实体，再选择图 2-133 所示的面进行几何分割，分割完成后由分割面将几何变成两个实体。

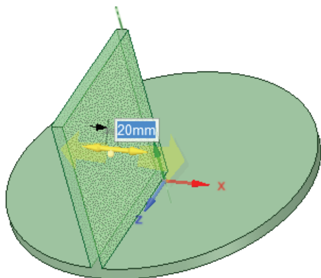


图 2-132　面拉伸成体

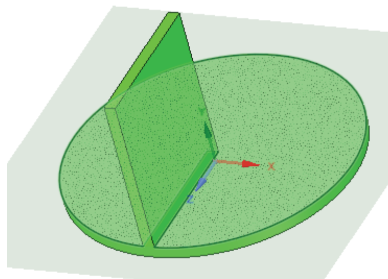


图 2-133　几何分割

Step13：单击“设计”选项卡中的按钮，然后选中上面的薄板实体，在左侧的设计栏中输入“圆计数”为 8，“角度”为 360°，坐标轴为底盘的轴线，如图 2-134 所示。

Step14：单击绘图窗口中的按钮，完成几何阵列如图 2-135 所示。

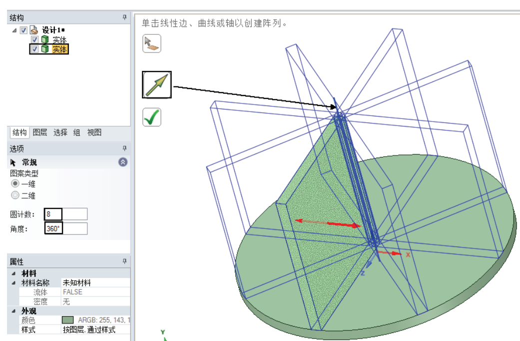


图 2-134　阵列设置

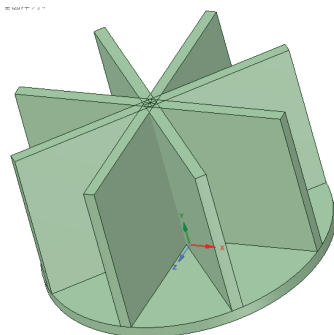


图 2-135　完成几何阵列

Step15：选中底部圆盘几何，单击“设计”选项卡中的按钮，然后按住〈Ctrl〉键不放，沿着坐标轴 Y 轴滑动鼠标，如图 2-136 所示，此时底盘几何将被复制出一份。

注意：如果不按住鼠标，则几何将直接移动到当前位置，请读者注意。

Step16：输入移动高度为 300mm，如图 2-137 所示。

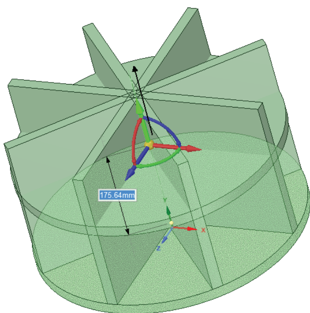


图 2-136　复制移动

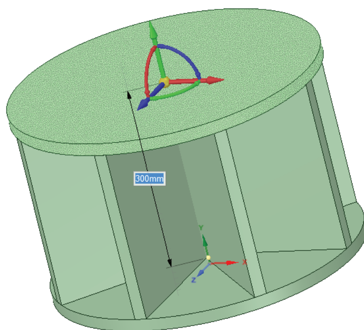


图 2-137　创建几何

Step17：单击工具栏中的按钮，在弹出的“保存”对话框中输入 pedestor。欲关闭 SpaceClaim 程序，单击右上角的按钮即可。

2.3 本章小结



本章介绍了有限元分析中的第一个关键过程——几何建模，主要讲解了 ANSYS Workbench 16.0 几何建模的方法及集成在 Workbench 平台上的 DesignModeler 几何建模工具的建模方法，另外，通过一个应用实例讲解了在 Workbench 平台中几何建模的操作方法。



第 3 章　网 格 划 分

在有限元计算中只有网格的节点和单元参与计算，求解开始后，Meshing 平台会自动生成默认的网格，用户可以使用默认网格，并检查网格是否满足要求，如果自动生成的网格不能满足工程计算的需要，则需要人工划分网格，细化网格和不同的网格对结果影响比较大。

网格的结构和网格的疏密程度直接影响到计算结果的精度，但是网格加密会增加 CPU 计算时间，且需要更大的存储空间。理想的情况下，用户需要的网格密度是结果不再随网格的加密而改变的密度，即当网格细化后，解没有明显改变；如果可以合理地调整收敛控制选项同样可以得到满足要求的计算结果，但是，细化网格不能弥补不准确的假设和输入引起的错误，这一点需要读者注意。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
ANSYS Workbench 网格划分的原理		√		
ANSYS Workbench 网格质量检查方法			√	√
ANSYS Workbench 不同求解域网格划分			√	√
ANSYS Workbench 外部网格导入与导出			√	√

3.1　ANSYS Meshing 16.0 网格划分

3.1.1　Meshing 网格划分适用领域

Meshing 平台网格划分可以根据不同的物理场需求提供不同的网格划分方法，图 3-1 所示为 Mesh 平台的物理场参照类型（Physics Preference）。

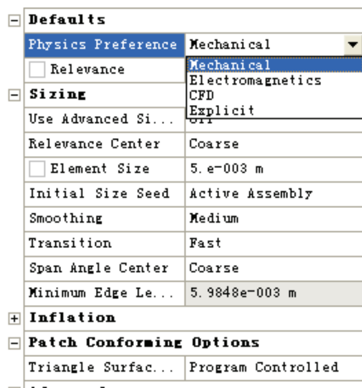


图 3-1　网格划分物理参照设置

1）Meshing：为结构及热力学有限元分析提供网格划分。

2）Electromagnetics：为电磁场有限元分析提供网格划分。

3）CFD：为计算流体动力学分析提供网格划分，如 CFX 及 Fluent 求解器。

4）Explicit：为显示动力学分析软件提供网格划分，如AUTODYN及 LS-DYNA 求解器。

3.1.2 Meshing 网格划分方法

对于三维几何来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法。

1）Automatic（自动网格划分）。

2）Tetrahedrons（四面体网格划分），当选择此选项时，网格划分方法又可细分为：

● Patch Conforming 法（Workbench 自带功能）。

——默认时考虑所有的面和边（尽管在收缩控制和虚拟拓扑时会改变且默认损伤外貌基于最小尺寸限制）。

——适度简化 CAD（如 native CAD，Parasolid，ACIS 等）。

——在多体部件中可能结合使用扫掠方法生成共形的混合四面体/棱柱和六面体网格。

——有高级尺寸功能。

——表面网格→体网格。

● Patch Independent 法（基于 ICEM CFD 软件）：

——对 CAD 有长边的面，许多面的修补，短边等有用。

——内置 defeaturing/simplification 基于网格技术。

——体网格→表面网格。

3）Hex Dominant（六面体主导网格划分），当选择此选项时，Mesh 将采用六面体单元划分网格，但是会包含少量的金字塔单元和四面体单元。

4）Sweep（扫掠法）。

5）MultiZone（多区法）。

6）Inflation（膨胀法）。

对于二维几何体来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法。

1）Quad Dominant（四边形主导网格划分）。

2）Triangles（三角形网格划分）。

3）Uniform Quad/Tri（四边形/三角形网格划分）。

4）Uniform Quad（四边形网格划分）。

图 3-2 所示为采用 Automatic 网格划分方法得出的网格分布。

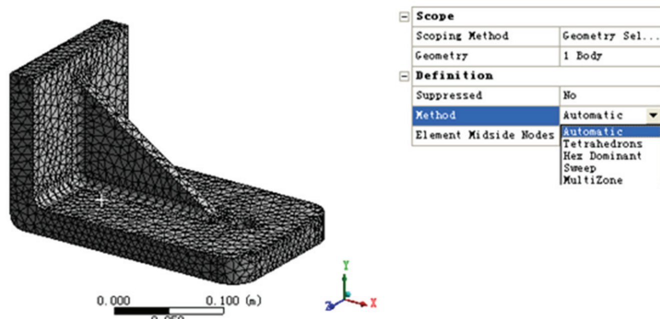


图 3-2　Automatic 网格划分方法

图 3-3 所示为采用 Tetrahedrons 及 Patch Conforming 网格划分方法得出的网格分布。

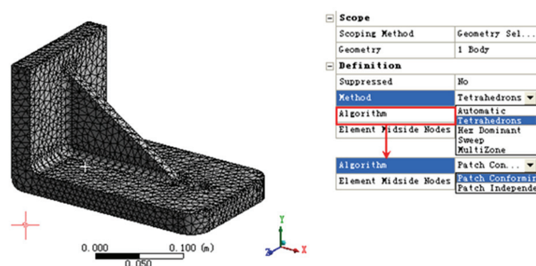


图 3-3 Tetrahedrons 网格划分方法

图 3-4 所示为采用 Tetrahedrons 及 Patch Independent 网格划分方法得出的网格分布。

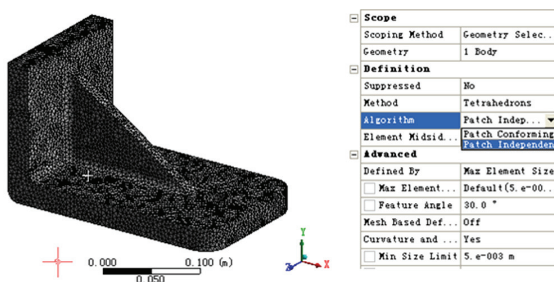


图 3-4 Tetrahedrons 及 Patch Independent 网格划分方法

图 3-5 所示为采用 Hex Dominant 网格划分方法得出的网格分布。

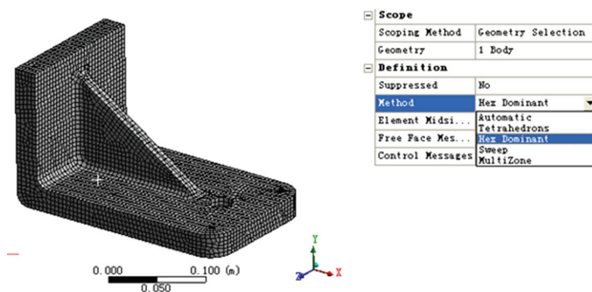


图 3-5 Hex Dominant 网格划分方法

图 3-6 所示为采用 Sweep 法划分的网格模型。

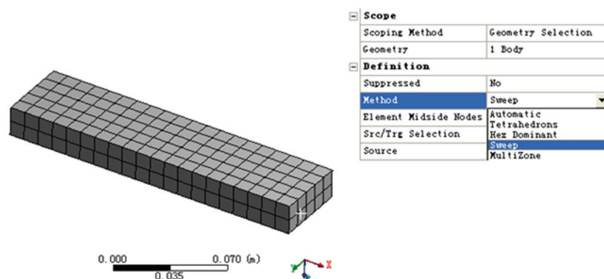


图 3-6 Sweep 网格划分方法

图 3-7 所示为采用 MultiZone 方法划分的网格模型。

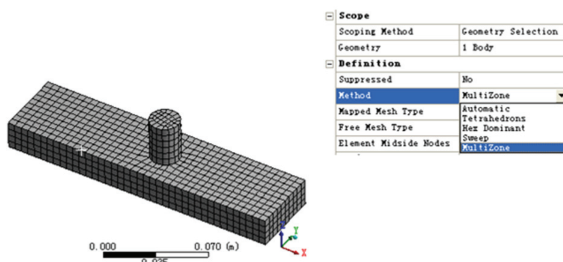


图 3-7 MultiZone 网格划分方法

图 3-8 所示为采用 Inflation 方法划分的网格模型。

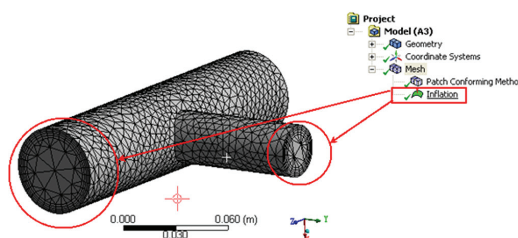


图 3-8 Inflation 网格划分方法

3.1.3 Meshing 网格默认设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of “Mesh”参数设置面板中的 Defaults 中进行物理模型选择和相关性设置。

图 3-9～图 3-12 所示为 1mm×1mm×1mm 的立方体在默认网格设置情况下，结构计算（Meshing）、电磁场计算（Electromagnetics）、流体动力学计算（CFD）及显式动力学分析（Explicit）4 个不同物理模型的节点数和单元数。

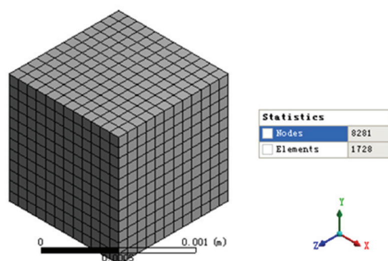


图 3-9 结构计算网格

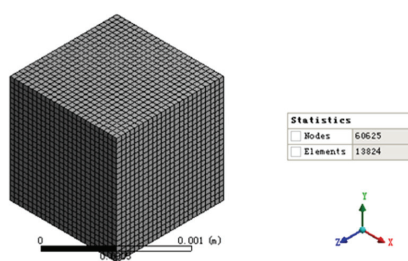


图 3-10 电磁计算网格

从中可以看出，在程序默认情况下，单元数量由小到大的顺序为：流体动力学分析=结构分析<显式动力学分析=电磁场分析；节点数量由小到大的顺序为：流体动力学分析<结构分析<显式动力学分析<电磁场分析。

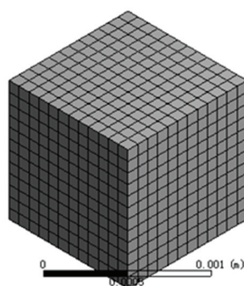
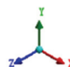



图 3-11　流体计算网格

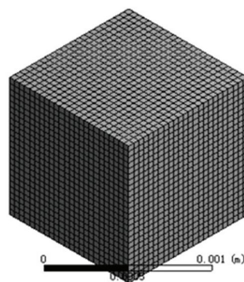
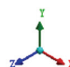



图 3-12　显示动力学计算网格

当物理模型确定后，可以通过调整 Relevance 选项来调整网格疏密程度，图 3-13～图 3-16 所示为在 Meshing（结构计算物理模型）时，Relevance 分别为-100、0、50、100 4 种情况时的单元数量和节点数量，对比这 4 张图可以发现 Relevance 值越大，节点和单元划分的数量越多。

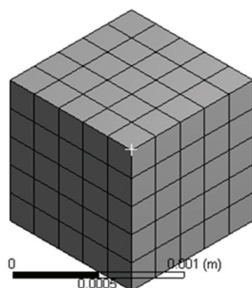
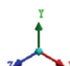



图 3-13　Relevance=-100 时单元节点数量

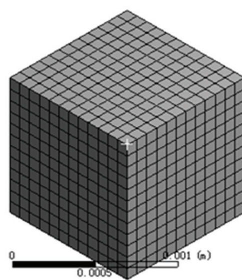
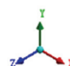



图 3-14　Relevance=0 时单元节点数量

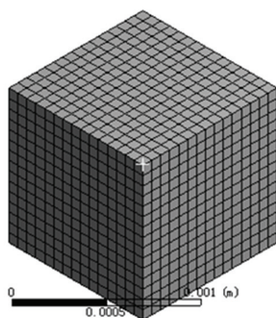
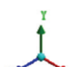



图 3-15　Relevance=50 时单元节点数量

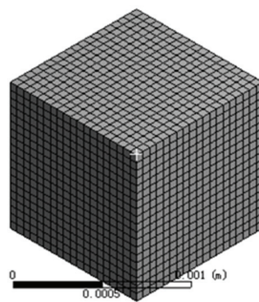
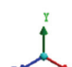



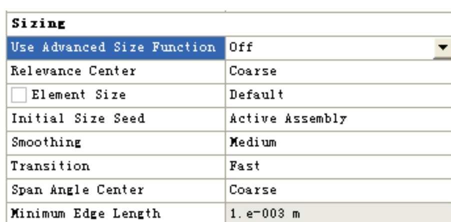
图 3-16　Relevance=100 时单元节点数量

3.1.4 Meshing 网格尺寸设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Sizing 中进行网格尺寸的相关设置，图 3-17 所示为 Sizing（尺寸）设置面板。

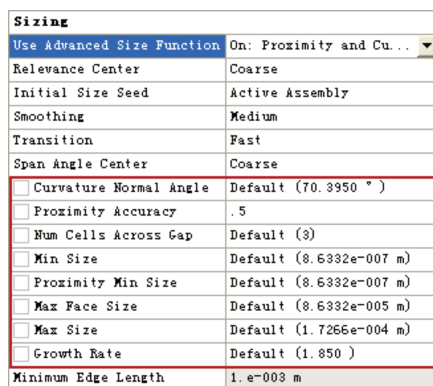
1）Using Advanced Size Function（使用高级网格划分方式）：网格细化的方法，此选项默认为关闭（Off）状态，单击后面的▼图标，可以看到 Using Advanced Size Function 状态为 On 时的其他 4 个选项：

当选择 On：Proximity and Curvature（接近和曲率）选项时，面板会增加网格控制设置，如图 3-18 所示。



Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1. e-003 m

图 3-17　Sizing 设置面板



Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Cu...
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (70. 3950 °)
Proximity Accuracy	. 5
Num Cells Across Gap	Default (3)
Min Size	Default (8. 6332e-007 m)
Proximity Min Size	Default (8. 6332e-007 m)
Max Face Size	Default (8. 6332e-005 m)
Max Size	Default (1. 7266e-004 m)
Growth Rate	Default (1. 850)
Minimum Edge Length	1. e-003 m

图 3-18　Using Advanced Size Function 设置

针对 Proximity and Curvature 选项的设置 Meshing 平台根据几何模型的尺寸，均有相应的默认值，读者也可以结合工程需要对以下各个选项进行修改与设值，来满足工程仿真计算的要求。

当选择其他 3 个选项时的设置与 Using Advanced Size Function 相似，这里不再赘述，请读者自己完成。

2）Relevance Center（相关性中心）：此选项的默认值为 Coarse（粗糙），根据需要可以分别设置为 Medium（中等）和细化（Fine），图 3-19～3-21 所示为将 1mm×1mm×1mm 的立方体中 Relevance Center 分别为 Coarse、Medium、Fine 3 种情况时的节点和单元数量。

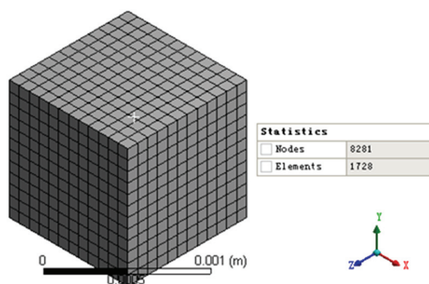


图 3-19　Relevance Center =Coarse 时节点和单元数

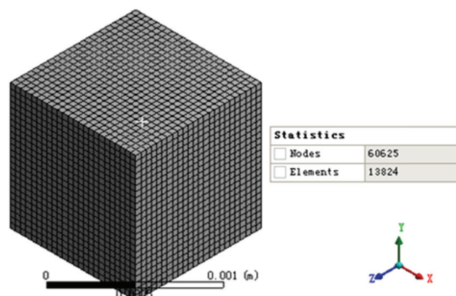


图 3-20　Relevance Center =Medium 时节点和单元数

从以上 3 种设置可以看出，当 Relevance Center 的选项由 Coarse 到 Fine 后，几何模型的节点数量和单元数量逐渐增加，已达到细化网格的目的。

3）Element Size（单元尺寸）：通过在此选项后面输入网格尺寸大小来控制几何尺寸网格划分的粗细程度，图 3-22～3-24 所示为 Element Size 设置为默认、Element Size=1.e−

004m、Element Size=4.e−004m 3 种情况下的节点数量及单元数量。

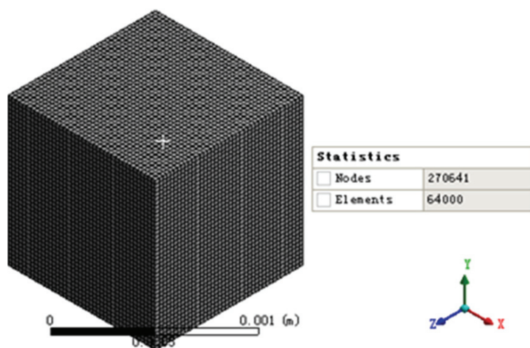


图 3−21　Relevance Center =Fine 时节点和单元数

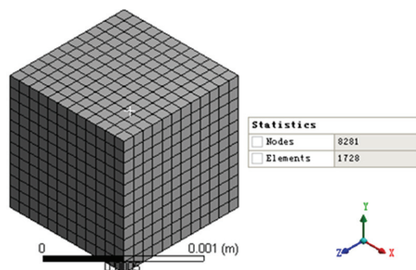


图 3−22　Element Size 设置为默认

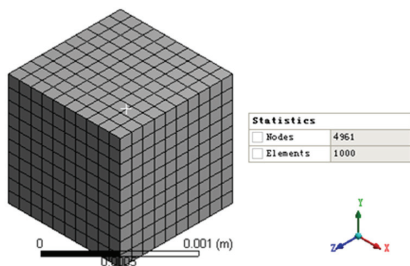


图 3−23　Element Size =1.e−004m

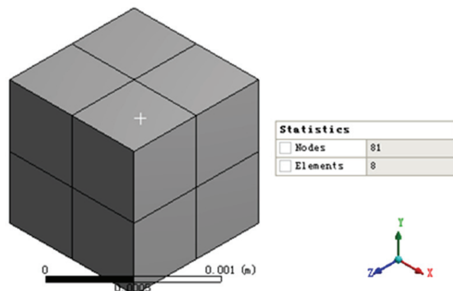


图 3−24　Element Size =5.e−004m

从图 3−22～图 3−24 可以看出，网格划分可以通过设置网格单元尺寸的大小来控制。

4）Initial Size Seed（初始化尺寸种子）：此选项用来控制每一个部件的初始网格种子，如果单元尺寸已被定义，则会被忽略，在 Initial Size Seed 栏中有 3 种选项可供选择，即 Active Assembly（激活的装配体）、Full Assembly（全部装配体）及 Part（零件），下面对这 3 种选项分别进行讲解。

- Active Assembly（激活的装配体）：基于这个设置，初始种子放入未抑制部件，网格可以改变。
- Full Assembly（全部装配体）：基于这个设置，初始种子放入所有装配部件，不管抑制部件的数量，由于抑制部件网格不改变。
- Part（零件）：基于这个设置，初始种子在网格划分时放入个别特殊部件，由于抑制部件网格不改变。

5）Smoothing（平滑度）：平滑网格是通过移动周围节点和单元的节点位置来改进网格质量。下列 3 个选项是对不同分析领域进行了限值的默认设置。

- 低（Low）：主要应用于结构计算，即 Meshing。
- 中（Medium）：主要应用于流体动力学和电磁场计算，即 CFD 和 Emag。
- 高（High）：主要应用于显式动力学计算，即 Explicit。

6）Transition（过渡）：过渡是控制邻近单元增长比的设置选项，有以下两种设置。

- 快速（Fast）：在 Meshing 和 Emag 网格中产生网格过渡。
- 慢速（Slow）：在 CFD 和 Explicit 网格中产生网格过渡。

7）Span Angle Center（跨度中心角）：跨度中心角设定基于边的细化的曲度目标，网格在弯曲区域细分，直到单独单元跨越这个角。有以下几种选择。

- 粗糙（Coarse）：角度范围在-90°～60° 之间。
- 中等（Medium）：角度范围在-75°～24° 之间。
- 细化（Fine）：角度范围在-36°～12° 之间。

需要注意的是，Span Angle Center 功能只能在 Advanced Size Function 选项关闭时使用。

图 3-25 和图 3-26 所示为当 Span Angle Center 选项分别设置为 Coarse 和 Fine 时的网格，从图样可以看出，在 Span Angle Center 选项设置由 Coarse 到 Fine 的过程中，中心圆孔的网格剖分数量逐渐加密，网格角度逐渐变小。

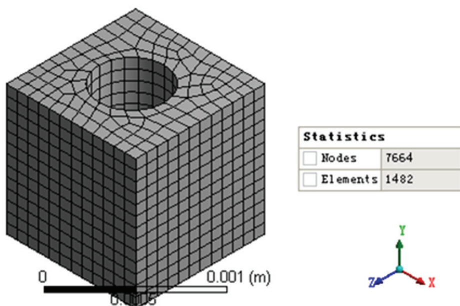


图 3-25 Span Angle Center=Coarse

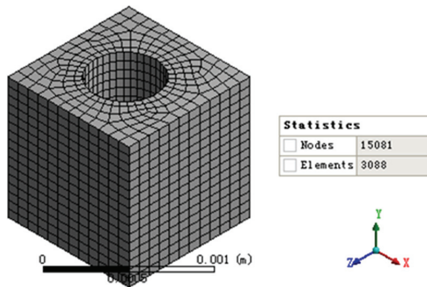


图 3-26 Span Angle Center=Fine

3.1.5 Meshing 网格膨胀层设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Inflation 中进行网格膨胀层的相关设置，图 3-27 所示为 Inflation（膨胀层）设置面板。

Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

图 3-27 膨胀层设置

1）Use Automatic Inflation（使用自动控制膨胀层）：使用自动控制膨胀层默认为 None，其后面有 3 个可选择的选项。

- 不使用自动控制膨胀层（None）：程序默认选项，即不需要人工控制程序自动进行膨胀层参数控制。

● 程序控制膨胀层（Program Controlled）：人工控制生成膨胀层的方法，通过设置总厚度、第一层厚度、平滑过渡等来控制膨胀层生成的方法。

● 以命名选择所有面（All Faces in Chosen Named Selection）：通过选取已经被命名的面来生成膨胀层。

2）Inflation Option（膨胀层选项）：膨胀层选项对于二维分析和四面体网格划分的默认设置为平滑过渡（Smoothing Transition），除此之外膨胀层选项还有以下几项可以选择：

● 总厚度（Total Thickness）：需要输入网格最大厚度值（Maximum Thickness）。

● 第一层厚度（First Layer Thickness）：需要输入第一层网格的厚度值（First Layer Height）。

● 第一个网格的宽高比（First Aspect Ratio）：程序默认的宽高比为 5，用户可以修改宽高比。

● 最后一个网格的宽高比（Last Aspect Ratio）：需要输入第一层网格的厚度值（First Layer Height）。

3）Transition Ratio（平滑比率）：程序默认值为 0.272，用户可以根据需要对其进行更改。

4）Maximum Layers（最大层数）：程序默认的最大层数为 5，用户可以根据需要对其进行更改。

5）Growth Rate（生长速率）：相邻两侧网格中内层与外层的比例，默认值为 1.2，用户可根据需要对其进行更改。

6）Inflation Algorithm（膨胀层算法）：膨胀层算法包括前处理（基于 Tgrid 算法）和后处理（基于 ICEM CFD 算法）两种；

● 前处理（Pre）：基于 Tgrid 算法，所有物理模型的默认设置。首先表面网格膨胀，然后生成体网格，可应用扫掠和二维网格的划分，但是不支持邻近面设置不同的层数。

● 后处理（Post）：基于 ICEM CFD 算法，使用一种在四面体网格生成后作用的后处理技术，后处理选项只对 patching conforming 和 patch independent 四面体网格有效。

7）View Advanced Options（显示高级选项）：当此选项为开（Yes）时， Inflation（膨胀层）设置会增加图 3-28 所示的选项。

Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	Yes
Collision Avoidance	Stair Stepping
Gap Factor	0.5
Maximum Height over Base	1
Growth Rate Type	Geometric
Maximum Angle	140.0 °
Fillet Ratio	1
Use Post Smoothing	Yes
Smoothing Iterations	5

图 3-28　膨胀层高级选项

3.1.6 Meshing 网格 Patch Conforming 选项

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of “Mesh” 参数设置面板中的 Patch Conforming Options 中进行网格的相关设置，Patch Conforming Options 设置选项中有一个设置选项，如图 3-29 所示。



图 3-29 Patch Conforming Options 设置选项

Triangle Surface Mesher（三角形曲面划分器）：包括 Program Controlled 和 Advancing Front 两个选项可供选择。

3.1.7 Meshing 网格高级选项

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of “Mesh” 参数设置面板中的 Advanced 中进行网格高级选项的相关设置，图 3-30 所示为 Advanced（高级选项）设置面板。

Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For As...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled

图 3-30 高级选项设置

1）Shape Checking（形状检查）：针对不同物理场有不同的形状检查控制，具体如下。

- 标准结构计算网格形状（Standard Meshing）：基于结构计算的网格形状控制，利用 Meshing 程序控制。
- 改进的结构计算网格形状（Aggressive Meshing）：基于改进的结构计算的网格形状控制，利用 Meshing 程序控制。
- 电磁场计算网格形状（Electromagnetics）：基于电磁计算的网格形状控制，利用 Emag 程序控制。
- 流体动力学计算网格形状（CFD）：基于流体动力学计算的网格形状控制，利用 Fluent 或 CFX 程序控制。
- 显式动力学计算网格形状（Explicit）：基于显式动力学计算的网格形状控制，利用 AUTODYN 或 LS DYNA 程序控制。
- 无（None）：不使用网格形状控制命令。

2）Element Midside Nodes（单元中间节点）：默认为程序控制（Program Controlled），单元中间节点设置还可以利用以下两种方式。

- Dropped（去掉中间节点）：选择此选项后，在网格划分时将去除单元的中间节点。
- Kept（保留中间节点）：选择此选项后，在网格划分时将保留单元的中间节点。

3）Straight Sided Elements（直边单元）：默认设置为否（No），当模型中存在实体或者存在由 DM 得到的场体时进行显示。电磁分析时必须使用此命令。

4）Number of Retries（重试次数）：设置网格剖分时失败的重新划分次数。

5）Mesh Morphing（网格变形）：设置是否允许网格变形，即允许（Enable）或不允许（Disabled）。

3.1.8 Meshing 网格损伤设置

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Defeaturing（损伤）中进行网格损伤的相关设置，图 3-31 所示为 Defeaturing（损伤）设置面板。

Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	Yes
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default

图 3-31　损伤选项设置

1）Pinch Tolerance（收缩容差）：网格生成时会产生缺陷，收缩容差定义了收缩控制，用户自己定义网格收缩容差控制值，收缩只能对顶点和边起作用，对于面和体不能收缩。

以下网格方法支持收缩特性。

- Patch Conforming 四面体。
- 薄实体扫掠。
- 六面体控制划分。
- 四边形控制表面网格划分。
- 所有三角形表面划分。

2）Generate Pinch on Refresh（重新刷新时产生收缩）：默认为是（Yes）。

3）Automatic Mesh Based Defeaturing（基于损伤位置自动划分网格）：程序默认状态为开（On），即针对损伤处网格，程序自动控制处理合理化网格生成。

4）Defeaturing Tolerance（损伤容差）：程序为默认状态，用户可以根据工程需要自己设定损伤容差值来调整损伤网格，以满足工程需求。

3.1.9 Meshing 网格评估统计

Meshing 网格设置可以在 Mesh 下进行操作，单击模型树中的 Mesh 图标，在出现的 Details of“Mesh”参数设置面板中的 Statistics（统计）中进行网格统计及质量评估的相关设置，图 3-32 所示为 Statistics（统计）面板。

1）Nodes（节点数）：当几何模型的网格划分完成后，此处会显示节点数量。

2）Elements（单元数）：当几何模型的网格划分完成后，此处会显示单元数量。

3）Mesh Metric（网格质量）：默认为无（None），用户可以从中选择相应的网格质量检查工具来检查划分网格质量的好坏。

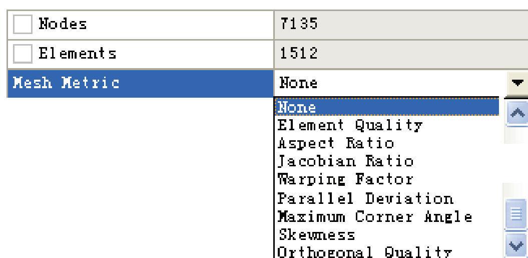


图 3-32 统计设置面板

Element Quality（单元质量）：选择单元质量选项后，此时在信息栏中会出现图 3-33 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

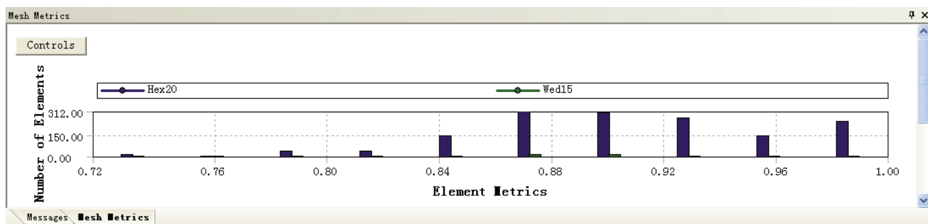


图 3-33 Element Quality 图表

- 图中横坐标由 0 到 1，网格质量由坏到好，衡量准则为网格的边长比。
- 图中纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条成正比。

Element Quality 图表中的值越接近于 1，说明网格质量越好。

单击图表中的 Control 按钮，此时弹出图 3-34 所示的单元质量控制图表，在图表中可以进行单元数及最大最小单元设置。

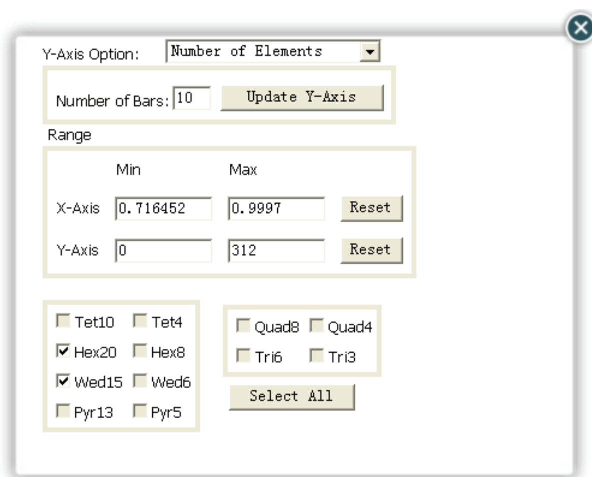


图 3-34 单元质量控制图表

Aspect Radio（网格宽高比）：选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-35 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

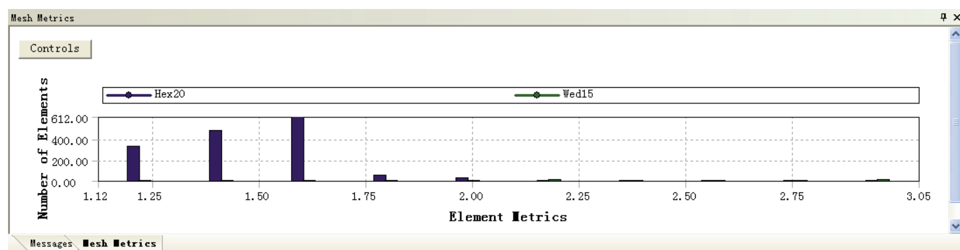


图 3-35　Aspect Ratio 图表

● 对于三角形网格来说，按法则判断。

如图 3-36 所示，从三角形的一个顶点引出对边的中线，另外两边中点相连，构成线段 KR，ST；分别做两个矩形：以中线 ST 为平行线，分别过点 R、K 构造矩形两条对边，另外两条对边分别过点 S、T；以中线 RK 为平行线，分别过点 S、T 构造矩形两条对边，另两条对边分别过点 R、K。

对另外两个顶点也如上面步骤做矩形，共 6 个矩形。找出各矩形长边与短边之比并开立方，数值最大者即为该三角形的 Aspect Ratio 值。

当 Aspect Ratio 值=1 时，三角形 IJK 为等边三角形，此时说明划分的网格质量最好。

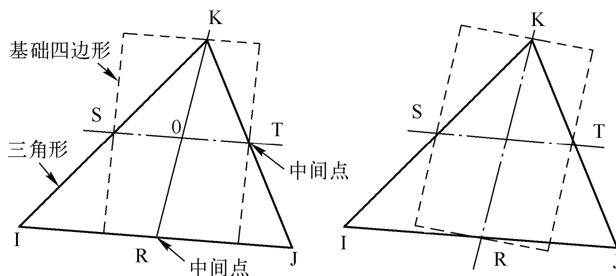


图 3-36　三角形判断法则

● 对于四边形网格来说，按法则判断。

如图 3-37 所示，如果单元不在一个平面上，各个节点将被投影到节点坐标平均值所在的平面上；画出两条矩形对边中点的连线，相交于一点 O；以交点 O 为中心，分别过 4 个中点构造 2 个矩形；找出两个矩形长边和短边之比的最大值，即为四边形的 Aspect Ratio 值。

当 Aspect Ratio 值=1 时，四边形 IJKL 为正方形，此时说明划分的网格质量最好。

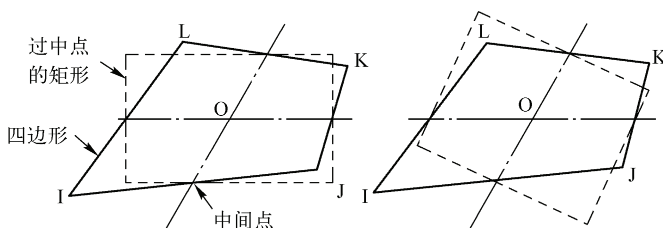


图 3-37　四边形判断法则

Jacobian Ratio（雅可比比率）：雅可比比率适应性较广，一般用于处理带有中节点的单元，选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-38 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

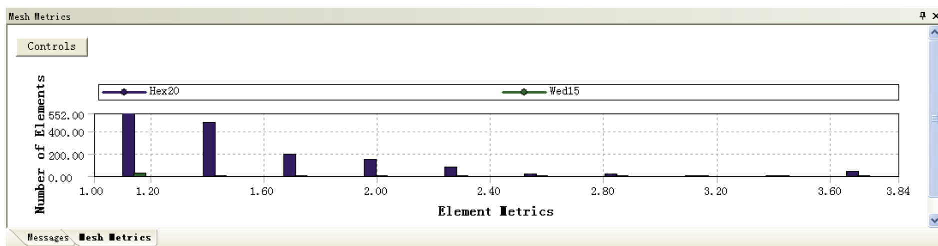


图 3-38 Jacobian Ratio 图表

Jacobian Ratio 计算法则如下。

计算单元内各样本点雅可比矩阵的行列式值 R_j；雅可比值是样本点中行列式最大值与最小值的比值；若两者正负号不同，雅可比值将为-100，此时该单元不可接受。

● 三角形单元的雅可比比率

如果三角形的每个中间节点都在三角形边的中点上，那么这个三角形的雅可比比率为 1，图 3-39 所示为雅可比比率分别为 1、30、100 时的三角形网格。

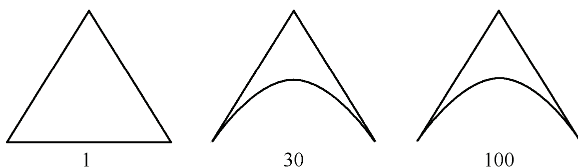


图 3-39 三角形网格（Jacobian Ratio=1、30、100）

● 四边形单元的雅可比比率

任何一个矩形单元或平行四边形单元，无论是否含有中间节点，其雅可比比率都为 1，如果垂直一条边的方向向内或者向外移动这一条边上的中间节点，可以增加雅可比比率，图 3-40 所示为雅可比比率分别为 1、30、100 时的四边形网格。

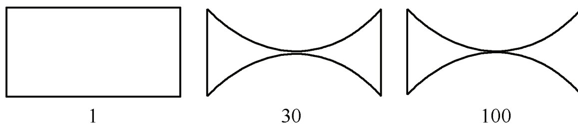


图 3-40 四边形网格（Jacobian Ratio=1、30、100）

● 六面体单元雅可比比率

满足以下两个条件的四边形单元和块单元的雅可比比率为 1：

◆ 所有对边都相互平行。

◆ 任何边上的中间节点都位于两个角点的中间位置。

图 3-41 所示为雅可比比率分别为 1、30、100 时的四边形网格，此四边形网格可以生成雅可比为 1 的六面体网格。

Wraping Factor（扭曲系数）：用于计算或者评估四边形壳单元、含有四边形面的块单元楔形单元及金字塔单元等，高扭曲系数表明单元控制方程不能很好地控制单元，需要重新划分。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-42 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示

了网格质量划分图表。

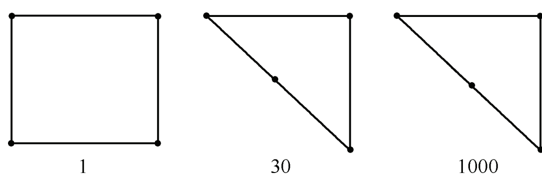


图 3-41　雅可比比率为 1 的四边形网格

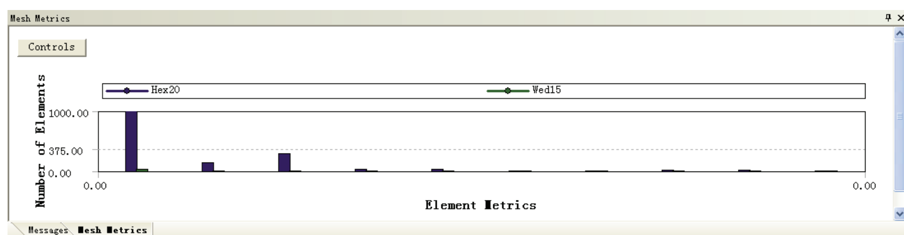


图 3-42　Mesh Metrics 窗口下的 Wraping Factor 图表

图 3-43 所示的是二维四边形壳单元的扭曲系数逐渐增加的二维网格变化图形，从图中可以看出扭曲系数由 0.0 增大到 5.0 的过程中网格扭曲程度逐渐增加。

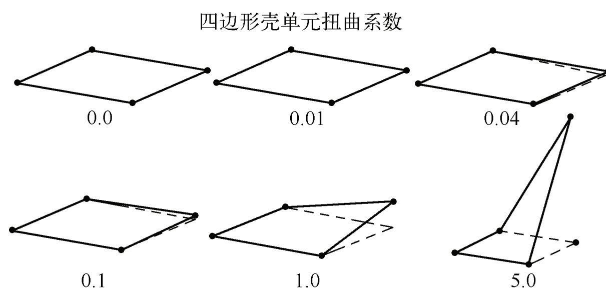


图 3-43　Wraping Factor 二维图形变化

对于三维曲线的扭曲系数来说，分别比较 6 个面的扭曲系数，从中选择最大值作为扭曲系数如图 3-44 所示。

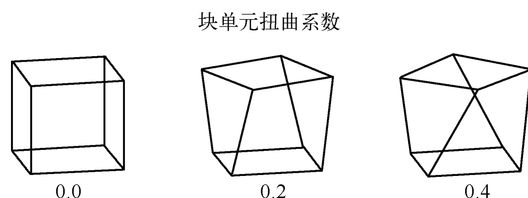


图 3-44　Wraping Factor 三维块单元变化

Parallel Deviation（平行偏差）：计算对边矢量的点积，通过点积中的余弦值求出最大的夹角。平行偏差为 0 最好，此时两对边平行。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-45 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

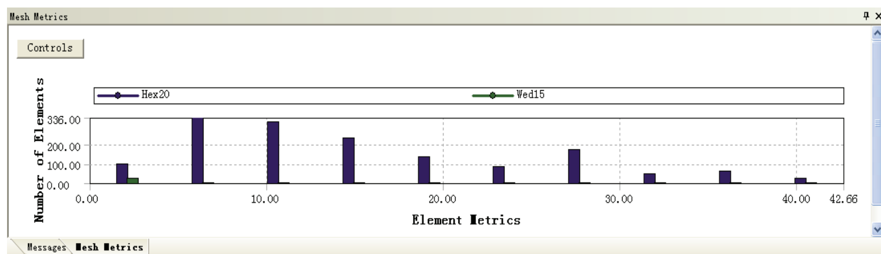


图 3-45 Mesh Metrics 窗口下的 Parallel Deviation 图表

图 3-46 所示为当 Parallel Deviation（平行偏差）值从 0 到 170 时的二维四边形单元变化图形。

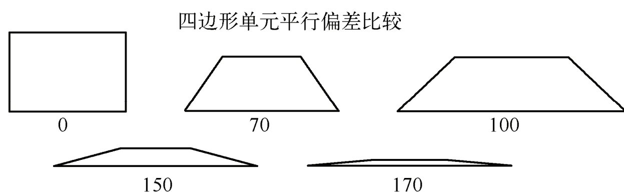


图 3-46 Parallel Deviation 二维四边形图形变化

Maximum Corner Angle（最大壁角角度）：计算最大角度。对三角形而言，60°最好，为等边三角形。对四边形而言，90°最好，为矩形。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-47 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

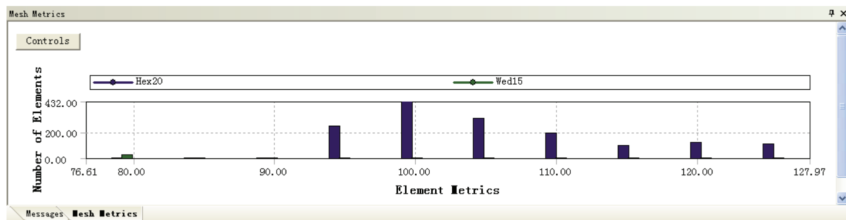


图 3-47 Maximum Corner Angle 图表

Skewness（偏斜）：网格质量检查的主要方法之一，有两种算法，即 Equilateral-Volume-Based Skewness 和 Normalized Equiangular Skewness。其值位于 0 和 1 之间，0 最好，1 最差。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-48 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

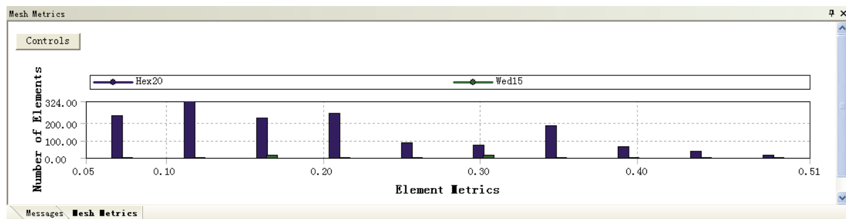


图 3-48 Skewness 图表

Orthogonal Quality（正交品质）：网格质量检查的主要方法之一，其值位于 0 和 1 之间，0 最差，1 最好。选择此选项后，此时在信息栏中会出现图 3-49 所示的 Mesh Metric 窗口，在窗口内显示了网格质量划分图表。

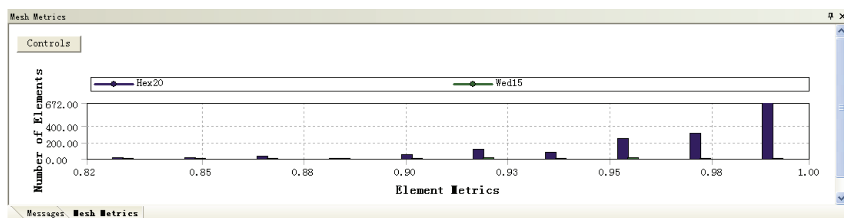


图 3-49　Orthogonal Quality 图表

3.2　ANSYS Meshing 16.0 网格划分实例

以上简单介绍了 ANSYS Meshing 网格划分的基本方法及一些常用的网格质量评估工具，下面通过几个实例简单介绍一下 ANSYS Meshing 网格划分的操作步骤及常见的网格格式的导入方法。

3.2.1　应用实例 1——网格尺寸控制

模型文件	网盘\Chapter03\char03-1\PIPE_model.stp
结果文件	网盘\Chapter03\char03-1\PIPE_model.wbpj

图 3-50 所示为模型（含流体模型），本实例主要讲解网格尺寸和质量的全局控制和局部控制，包括高级尺寸功能中的 Curvature 和 Proximity 的使用和 Inflation 的使用。下面对其进行网格剖分。

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16→Workbench 16 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-51 所示。

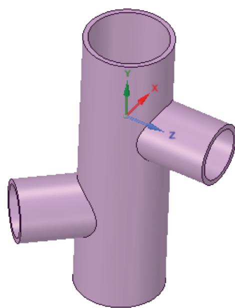


图 3-50　模型

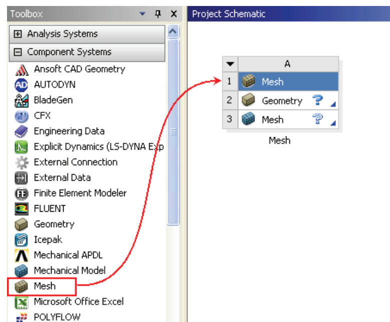


图 3-51　创建分析项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2（Geometry），如图 3-52 所示在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…选项。

Step4：如图 3-53 所示，在弹出的“打开”对话框中进行如下选择。

选择 PIPE_model.stp 格式文件，然后单击“打开”按钮。

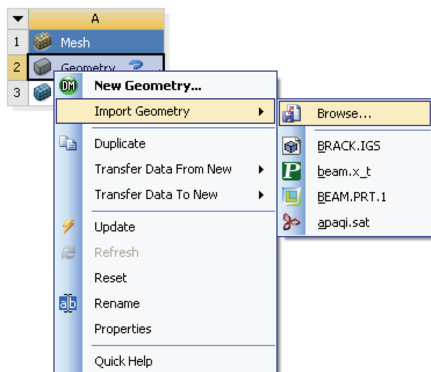


图 3-52　加载几何文件

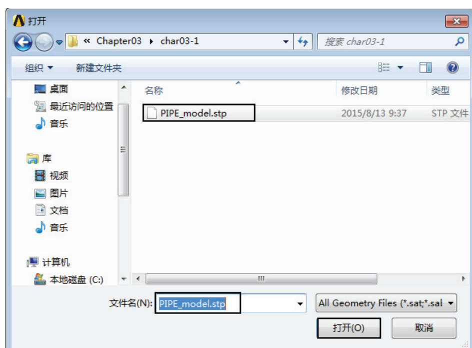


图 3-53　选择文件并打开

Step5：双击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，此时会弹出图 3-54 所示的 DesignModeler 平台。

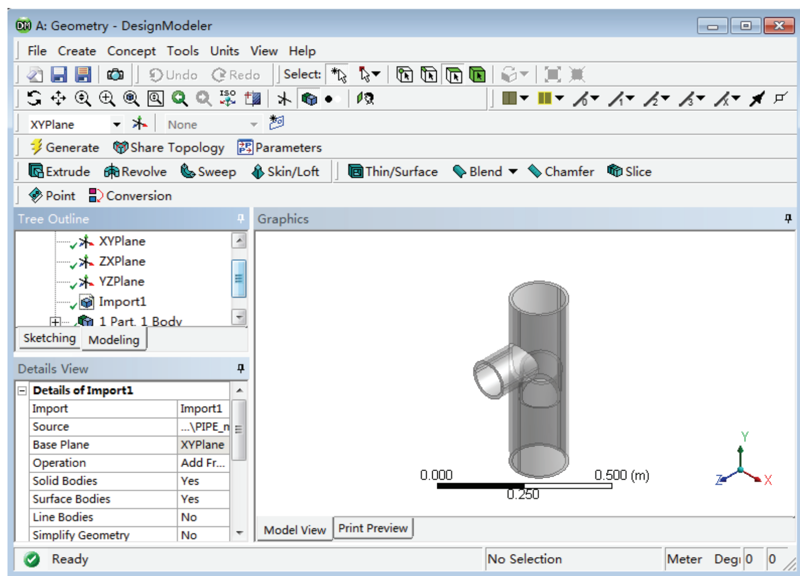


图 3-54　几何模型显示

Step6：填充操作。依次选择菜单栏中的 Tools→Fill 命令，在弹出的图 3-55 所示的 Details View 面板中进行如下操作。

在 Faces 栏中确保模型的两个内表面被选中。

单击工具栏中的 Generate 按钮生成实体。

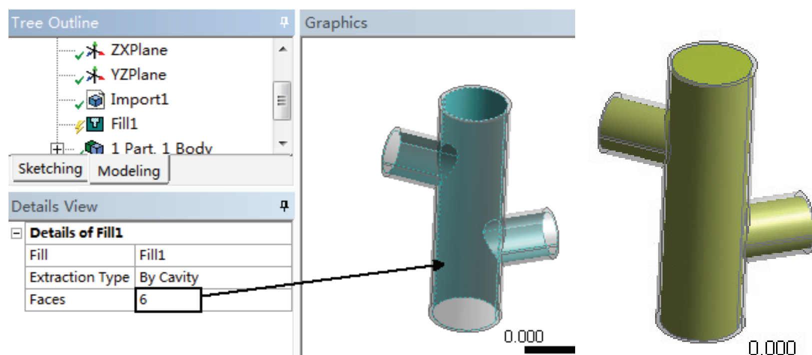


图 3-55　填充

Step7： 实体命名。右键单击模型树中图 3-56 所示的 solid，在弹出的快捷菜单中选择 Rename 命令，在命名区域中输入名字为 PIPE。

Step8： 同样操作将另外一个实体命名为 water，命名完成后如图 3-57 所示。

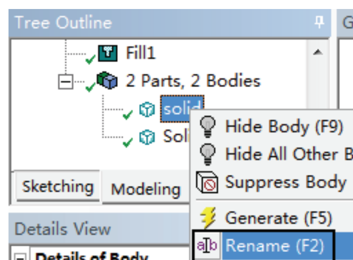


图 3-56　命名操作

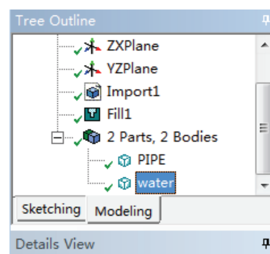


图 3-57　命名操作

Step9： 单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step10： 回到 Workbench 主窗口，如图 3-58 所示，单击 A3（Mesh）栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令。

Step11： Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-59 所示。

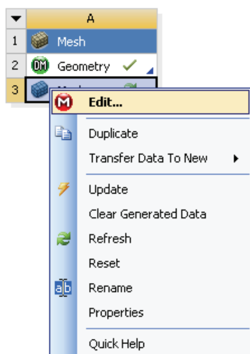


图 3-58　载入 Mesh

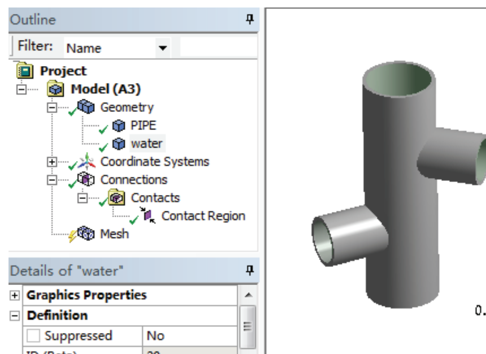


图 3-59　Mesh 平台中几何模型

Step12： 选择 Outline 中的 Project→Modal（A3）→Geometry→PIPE 命令，在图 3-60 所示 Details of“PIPE”面板中进行如下设置。

在 Material→Fluid/Solid 栏中将默认的 Defined By Geometry（Solid）修改为 Solid。

Step13： 同样操作，将 water 的 Material 属性由默认的 Defined By Geometry（Solid）修改为 Fluid，如图 3-61 所示。

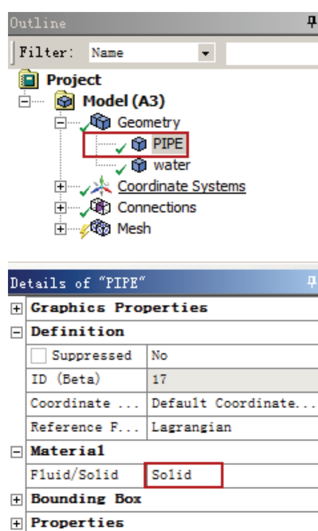


图 3-60 更改属性 1

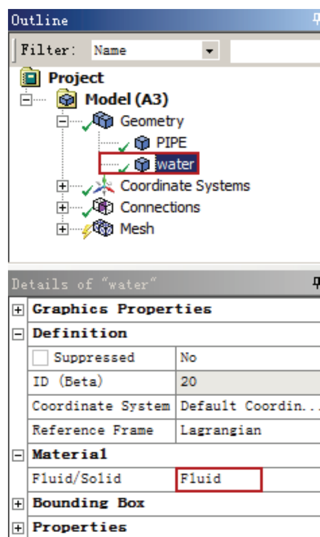


图 3-61 更改属性 2

Step14： 依次选择 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-62 所示快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

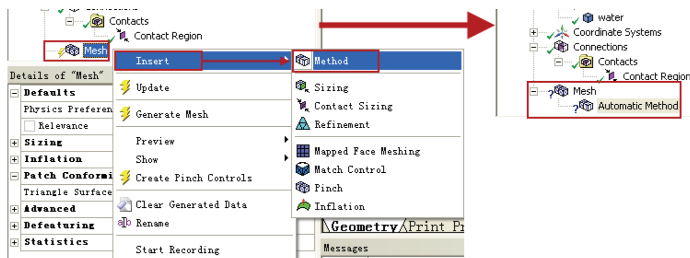


图 3-62 插入 Method 命令

Step15： 在图 3-63 所示的 Details of "Automatic method" 面板中进行如下操作。

在绘图区选择 PIPE 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中。

在 Definition→Method 栏中选择 Tetrahedrons（四面体网格划分）。

在 Algorithm 栏中选择 Patch Conforming 选项。

注意：当以上选项选择完毕后，Details of "Automatic Method" 会变成 Details of "Patch ConformingMethod" -Method，以后操作都会出现类似情况，不再赘述。

Step16： 依次选择 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-64 所示快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Inflation 命令。

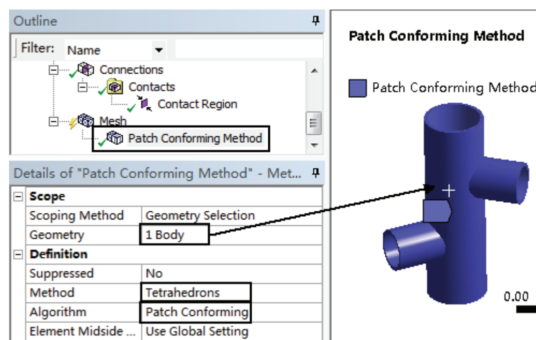


图 3-63　网格划分方法

Step17： 依次选择 Project→Modal（A3）→Geometry→PIPE 命令，在弹出的图 3-65 所示的快捷方式中选择 Hide Body（F9）命令或者按〈F9〉键，隐藏 PIPE 几何。

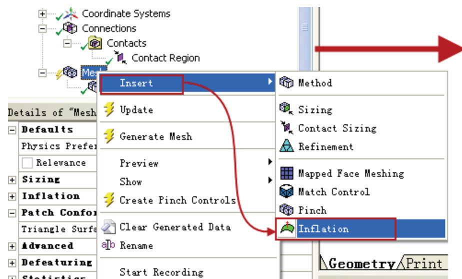


图 3-64　选择快捷命令

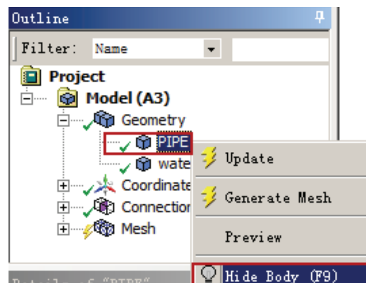


图 3-65　隐藏几何实体

Step18： 单击 Outline 中的 Inflation 按钮，在图 3-66 所示的 Details of“Inflation”面板中做如下设置。

选择 water 几何实体，然后在 Scope→Geometry 栏中单击 Apply 按钮。

选择三圆柱的外表面，然后在 Definition→Boundary 栏中单击 Apply 按钮。

其余选项默认即可，完成 Inflation（膨胀）面的设置。

Step19： 依次选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-67 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

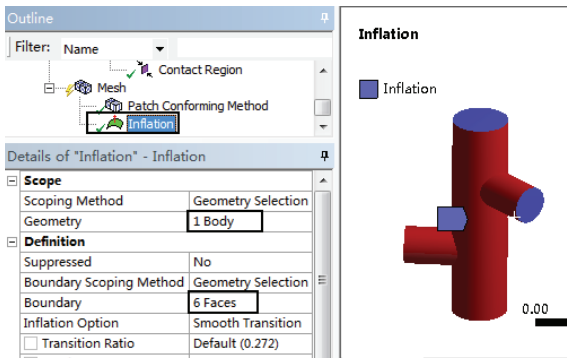


图 3-66　膨胀面设置

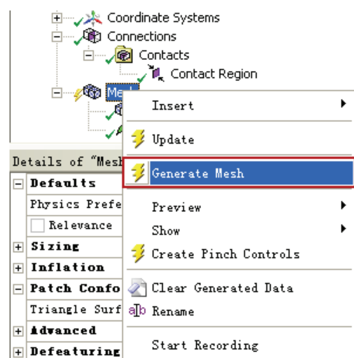


图 3-67　选择快捷菜单命令

Step20：此时会弹出图 3-68 所示的网格划分进度栏，进度栏中会显示网格划分的进度。

Step21：划分完成的网格如图 3-69 所示。

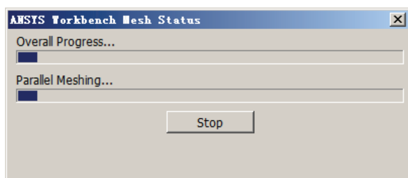


图 3-68　网格划分进度栏

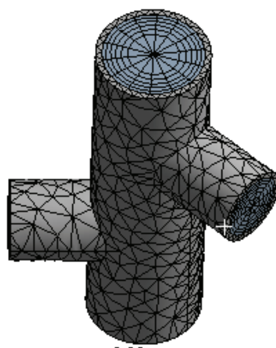
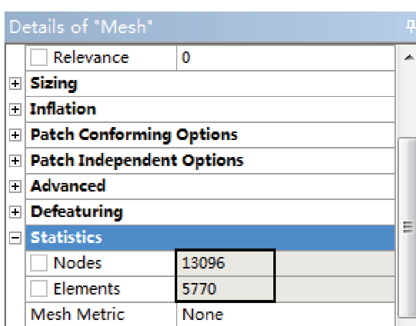


图 3-69　完成的网格模型

Step22：如图 3-70 所示，在 Details of “Mesh” 面板的 Statistics 中可以看到节点数和单元数以及扭曲程度。



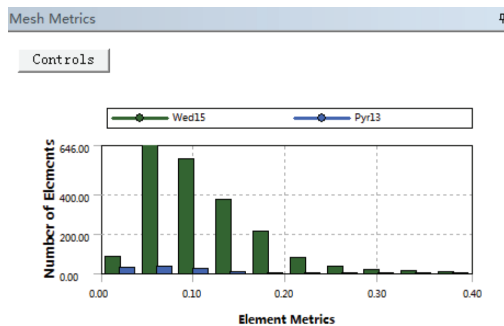


图 3-70　网格数量统计

Step23：如图 3-71 所示，将 Physics Preference 改为 CFD，其余设置不变，划分网格。

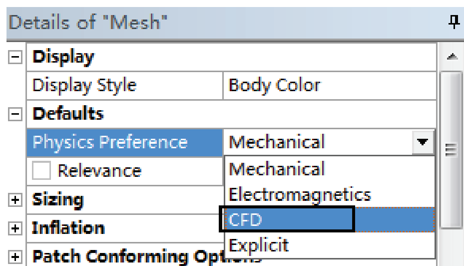


图 3-71　修改 Physics Preference

Step24：划分完成的网格及网格统计数据如图 3-72 所示。

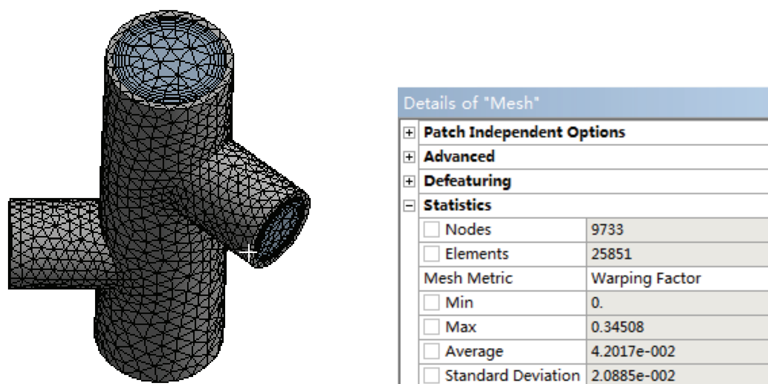


图 3-72　CFD 中的网格及数量

Step25：如图 3-73 所示，在几何绘图窗口单击 Z 坐标，使几何正对读者，单击工具栏中的图标，接着用鼠标单击几何模型上端，然后向下拉出一条直线，在下端再单击确定。

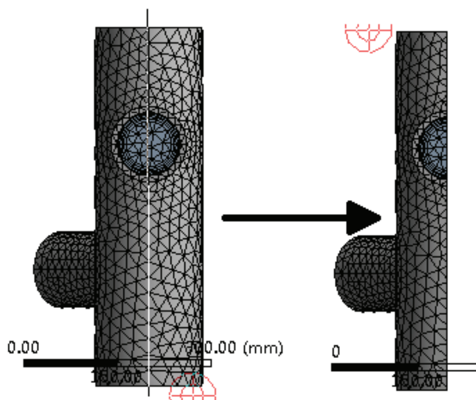


图 3-73　创建截面

Step26：如图 3-74 所示，旋转几何网格模型此时可以看到截面网格。

Step27：如图 3-75 所示，单击右下角 Section Plane 面板中的图标，此时可以显示截面网格的完整网格。

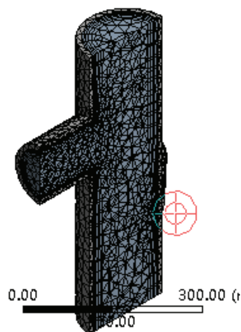


图 3-74　截面网格

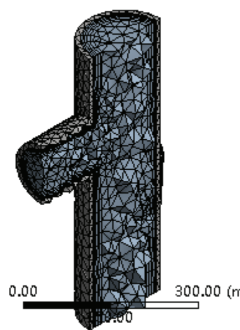


图 3-75　截面完整网格显示

Step28：如图 3-76 所示，在 Details of “Mesh” 面板中将 Use Advanced Aize Function 选项改为 On：Proximity and Curvature 后，划分完成后的网格。

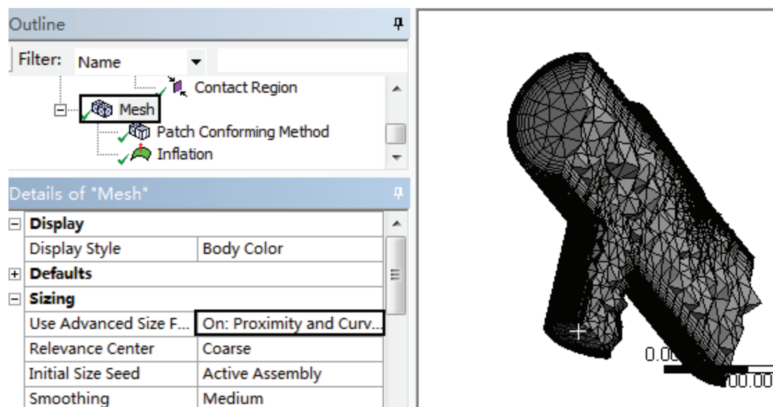


图 3-76　截面完整网格显示

Step29：单击 Meshing 平台上的“关闭”按钮，关闭 Meshing 平台。

Step30：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出来的“另存为”对话框中输入名字为 PIPE_Model，单击“保存”按钮保存即可。

3.2.2 应用实例 2——扫掠网格划分

模型文件	网盘\Chapter03\char03-2\PIPE_SWEEP.stp
结果文件	网盘\Chapter03\char03-2\PIPE_SWEEP.wbpj

图 3-77 所示为某钢管模型，本实例主要讲解通过扫掠网格的映射面划分网格的方法，强迫薄环厚度上的径向份数。下面对其进行网格剖分。

Step1：启动 ANSYS Workbench 15，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-78 所示。

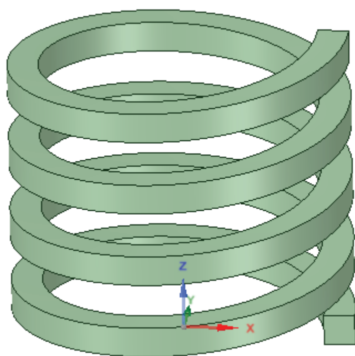


图 3-77　钢管模型

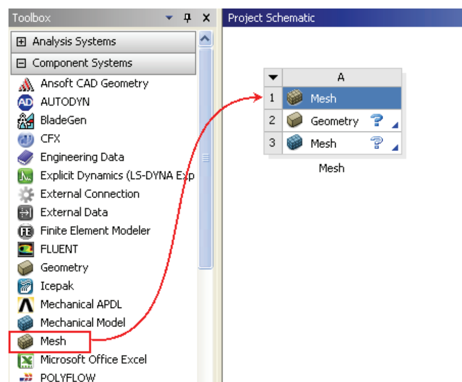


图 3-78　创建分析项目 A



Step3：右键单击项目 A 中的 A2（Geometry）在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…选项，如图 3-79 所示。

Step4：如图 3-80 所示，在弹出的“打开”对话框中进行如下选择。

在文件“类型”栏中选择“STEP 文件”格式。

选择 PIPE_SWEEP.STEP 格式文件，然后单击“打开”按钮。

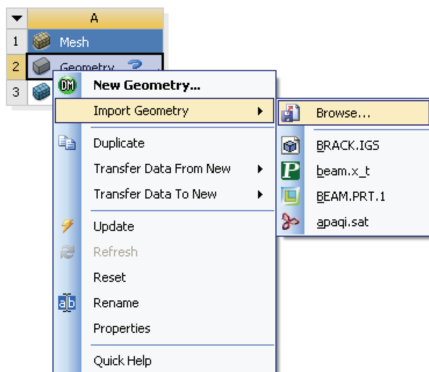


图 3-79　加载几何文件

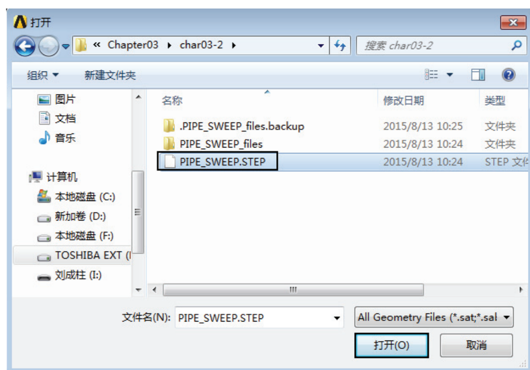


图 3-80　选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，此时会弹出图 3-81 所示的 DesignModeler 平台，单击 Generate 按钮。

Step6：此时将生成图 3-82 所示的几何实体。

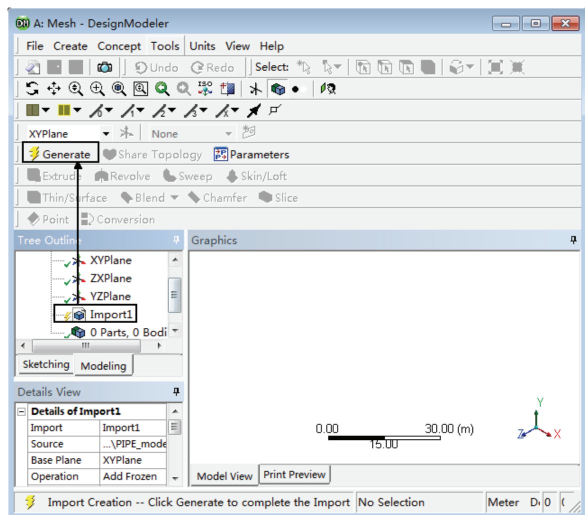


图 3-81　DesignModeler 平台

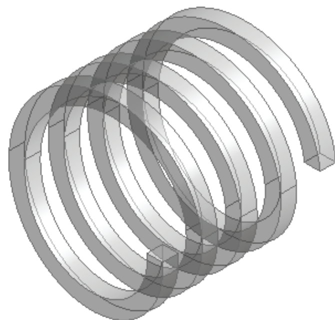
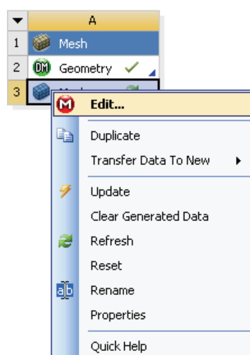


图 3-82　生成的几何模型

Step7：单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step8：回到 Workbench 主窗口，如图 3-83 所示，单击 A3（Mesh）栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令。

Step9：Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-84 所示。



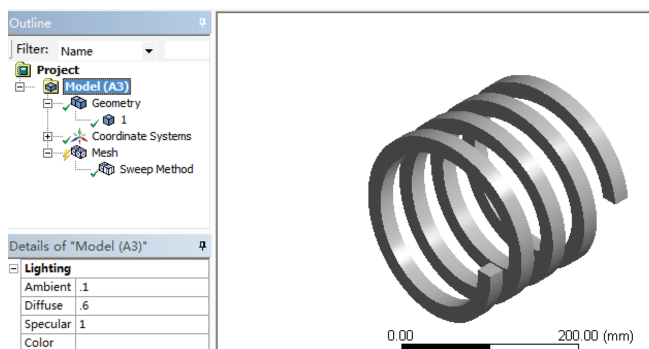


图 3-83　载入 Mesh　　　　图 3-84　Mesh 平台中几何模型

Step10：依次选择 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-85 所示快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

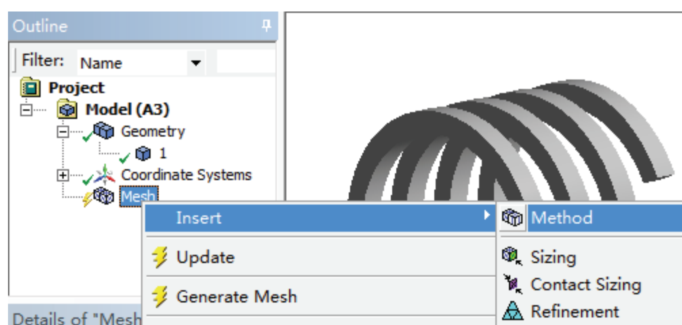


图 3-85　插入 Method 命令

Step11：在图 3-86 所示的 Details of “Automatic method” 面板中进行如下操作。

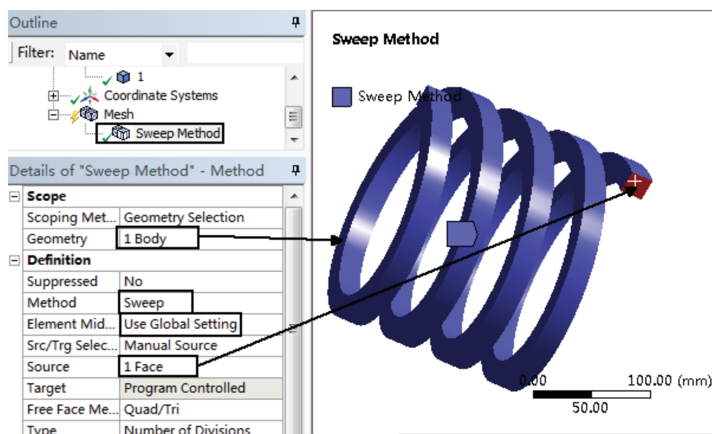


图 3-86　网格划分方法

在绘图区选择 1 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 按钮确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中。



在 Definition→Method 栏中选择 Sweep（扫掠）。

在 Src/Trg Selection 栏中选择 Manual Source 选项。

在 Source 栏中确保一个端面被选中，单击 Generate 按钮生成网格。

Step12： 依次选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-87 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step13： 此时会弹出图 3-88 所示的网格划分进度栏，进度栏中显示出网格划分的进度。

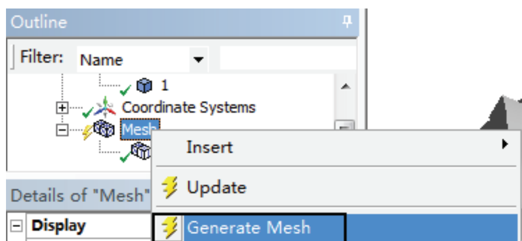


图 3-87 划分网格

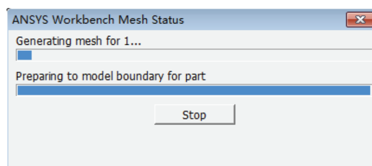


图 3-88 网格划分进度栏

Step14： 划分完成的网格如图 3-89 所示。

Step15： 如图 3-90 所示，在 Details of“Mesh”面板的 Statistics 中可以看到节点数和单元数以及扭曲程度。



图 3-89 网格模型

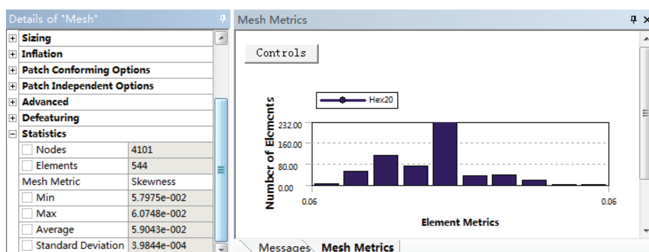


图 3-90 网格数量统计

Step16： 如图 3-91 所示，将 Physics Preference 改为 CFD，其余设置不变，划分网格。

Step17： 划分完成的网格及网格统计数据如图 3-92 所示。

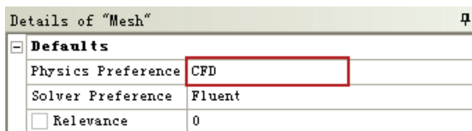


图 3-91 修改 Physics Preference

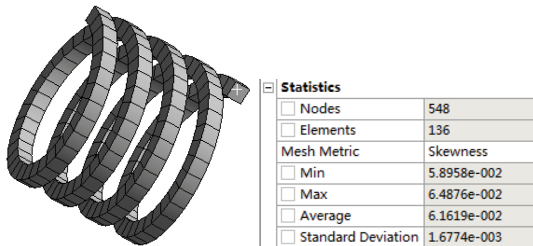


图 3-92 CFD 中的网格及数量

Step18： 单击 Meshing 平台上的“关闭”按钮，关闭 Meshing 平台。

Step19：返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出来的“另存为”对话框中输入名字为 PIPE_SWEEP，单击“保存”按钮保存文件。

3.2.3 应用实例 3——多区域网格划分

模型文件	网盘\Chapter03\char03-3\MULTIZONE.x_t
结果文件	网盘\Chapter03\char03-3\MULTIZONE.wbpj

图 3-93 所示为某三通管道模型，本实例主要讲解多区域方法的基本使用情况，对于具有膨胀层的简单几何生成六面体网格，在生成网格的时候，多区域扫掠网格划分器会自动选择源面。下面对其进行网格剖分。

Step1：启动 ANSYS Workbench 15，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-94 所示。

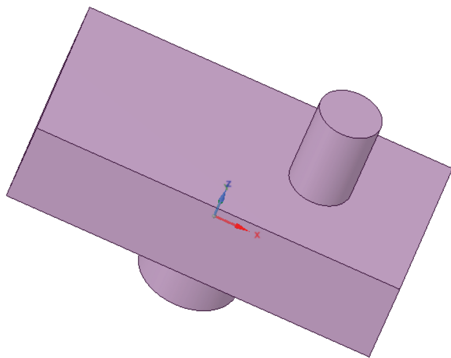


图 3-93 三通管道模型

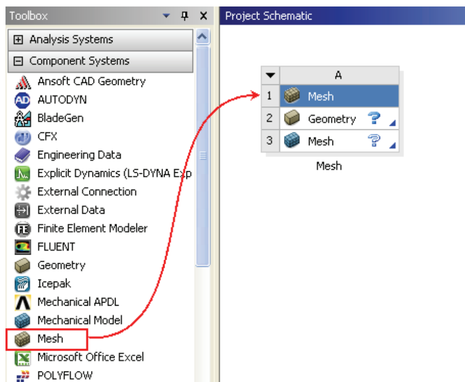


图 3-94 创建分析项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2（Geometry），在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…选项，如图 3-95 所示。

Step4：如图 3-96 所示，在弹出的“打开”对话框中进行如下选择。

选择 MULTIZONE.STEP 格式文件，然后单击“打开”按钮。

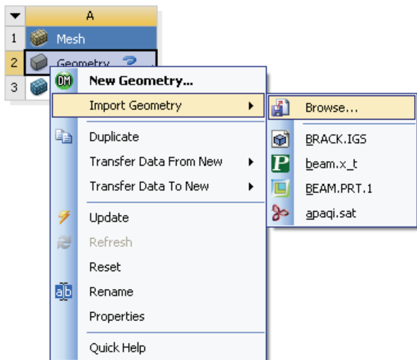


图 3-95 加载几何文件

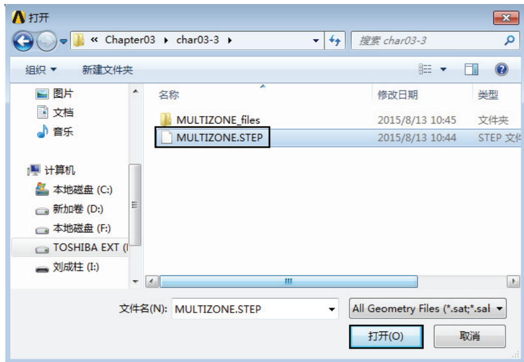


图 3-96 选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，此时会弹出图 3-97 所示的 DesignModeler 平台。

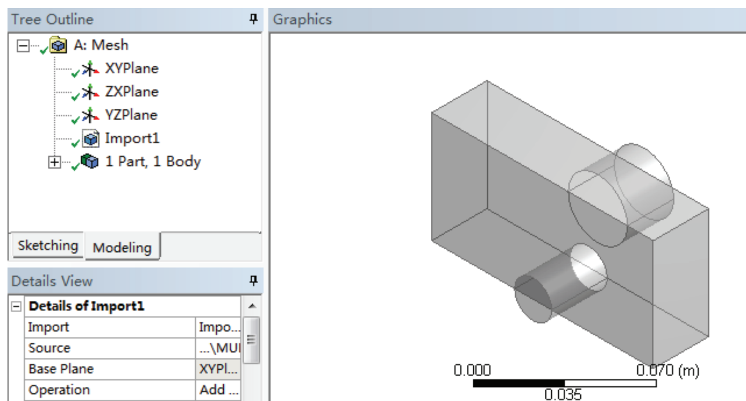


图 3-97 弹出 Design Modeler 平台

Step6：单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭 DesignModeler 平台。

Step7：回到 Workbench 主窗口，如图 3-98 所示，单击 A3（Mesh）栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令。

Step8：Mesh 网格划分平台被加载，如图 3-99 所示。

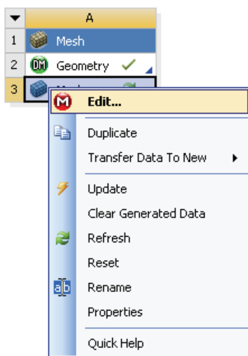


图 3-98 载入 Mesh

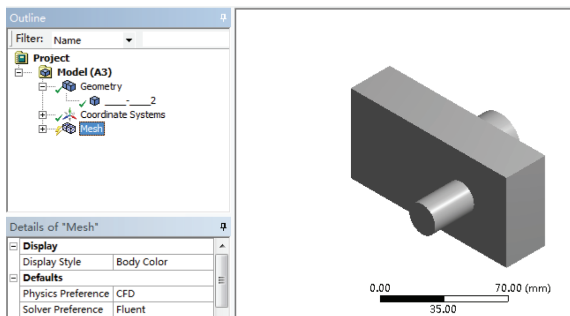


图 3-99 Mesh 平台中几何模型

Step9：依次选择 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-100 所示快捷菜单中选择 Insert→Method 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Automatic Method 命令。

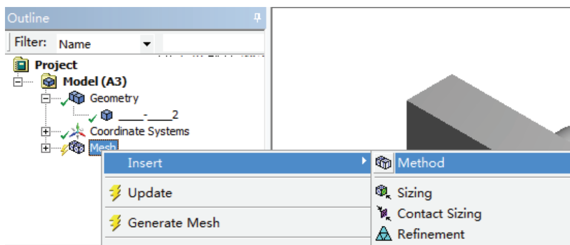


图 3-100 插入 Method 命令

Step10： 在图 3-101 所示的 Details of “Automatic method” 面板中进行如下操作。

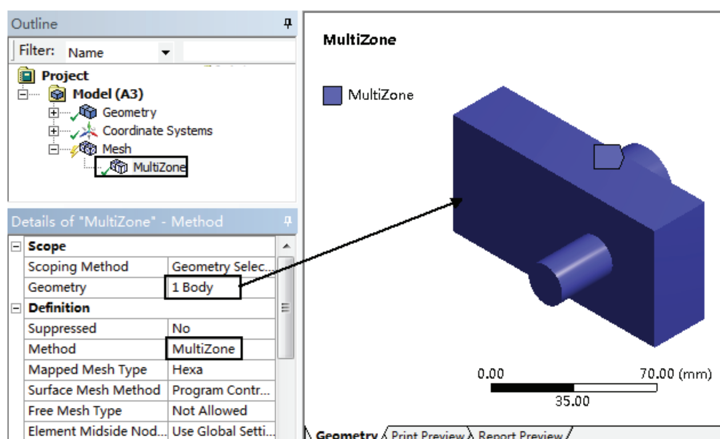


图 3-101 网格划分方法

在绘图区选择 Solid 实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 按钮确定选择，此时 Geometry 栏中显示 1Body，表示一个实体被选中。

在 Definition→Method 栏中选择 MultiZone（多区域）。

其余选项保持默认即可。

注意：当以上选项选择完毕后，Details of “Automatic Method” 会变成 Details of “MultiZone” -Method，以后操作都会出现类似情况，不再赘述。

Step11： 依次选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-102 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step12： 划分完成的网格如图 3-103 所示。

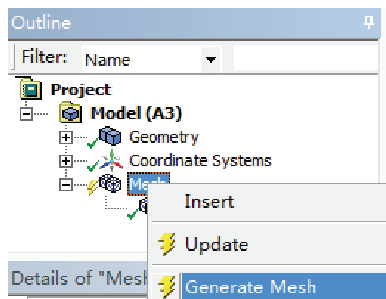


图 3-102 划分网格

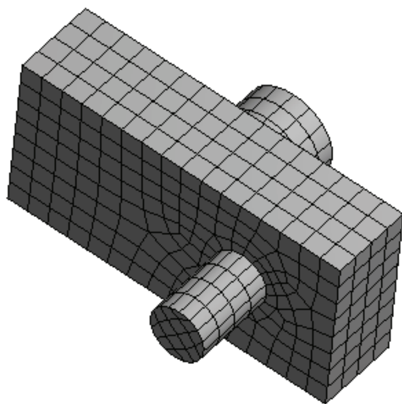


图 3-103 网格模型

Step13： 依次选择 Outline→Project→Mesh→MultiZone 命令，在弹出的图 3-104 所示快捷菜单中选择 Delete 命令，并删除 MultiZone 命令。



Step14： 依次选择 Outline→Project→Mesh 命令，在弹出的图 3-105 所示快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令，此时在 Mesh 下面会出现 Inflation 命令。

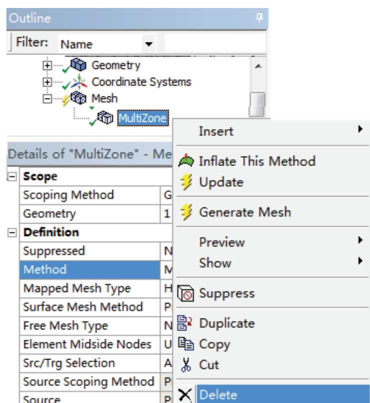


图 3-104 删除

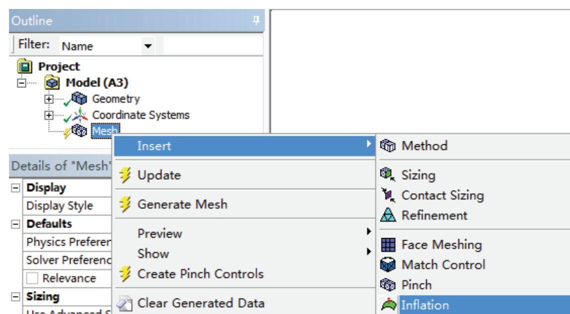


图 3-105 网格划分方法

Step15： 单击 Outline 中的 Inflation 按钮，在下面出现的 Details of "Inflation" 面板中做如下设置，如图 3-106 所示。

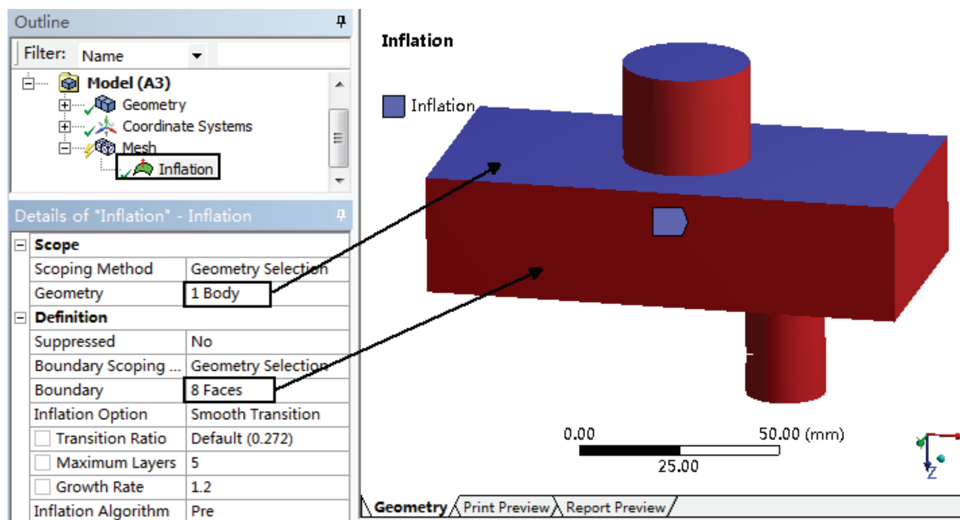


图 3-106 膨胀层设置

选择 Solid 几何实体，然后在 Scope→Geometry 栏中单击 Apply 按钮。

选择圆柱和长方体的外表面，然后在 Definition→Boundary 栏中单击 Apply 按钮。

其余选项默认即可，完成 Inflation（膨胀）面的设置。

Step16： 依次选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出图 3-107 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step17： 划分完成的网格如图 3-108 所示。

Step18： 单击 Meshing 平台上的“关闭”按钮，关闭 Meshing 平台。

Step19： 返回到 Workbench 平台，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出来的“另存

为”对话框中输入名字为 MULTIZONE，单击“保存”按钮保存文件。

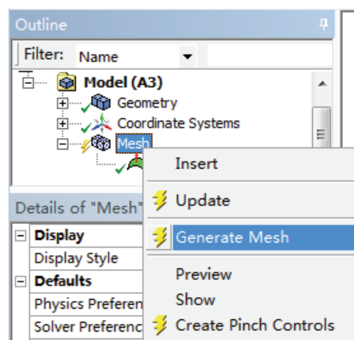


图 3-107 快捷菜单

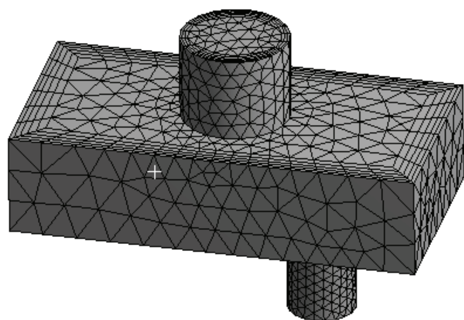


图 3-108 膨胀层网格划分

3.2.4 应用实例 4——CDB 网格导入

模型文件	网盘\Chapter03\char03-4\CDB2FEM.x_t
结果文件	网盘\Chapter03\char03-4\ CDB2FEM.wbpj

ANSYS 是功能强大的多物理场分析软件，其在各个分析领域都有非常出色的表现，在网格划分方面也做得比较出色，下面针对 ANSYS 划分完的网格导入 Workbench 平台的过程做简单介绍。

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Mechanical APDL 16.0 命令，启动 ANSYS APDL 16.0，进入主界面。

Step2：依次选择菜单 File→Import→PARA 命令，如图 3-109 所示。

Step3：在弹出的对话框中选择 CDB2FEM.x_t 文件名，单击 OK 按钮，打开文件，如图 3-110 所示，此时几何模型将显示在绘图窗口中，如图 3-111 所示。

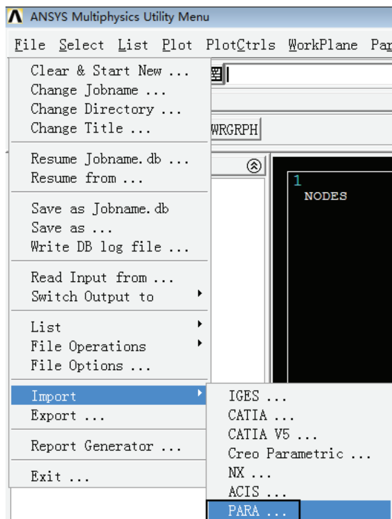


图 3-109 菜单

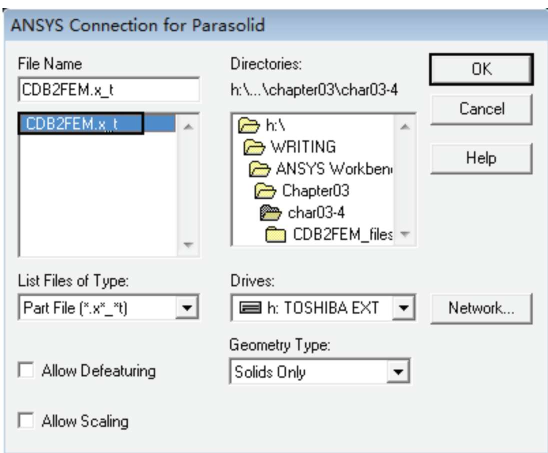


图 3-110 导入几何文件

Step4：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Add/Edit/Delete 命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Type 对话框中选择 Solid 和 20node186 两个选项，如图 3-112 所示，单击 OK 按钮，再单击 Close 按钮。

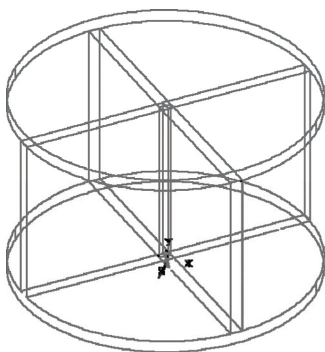


图 3-111　导入的几何模型

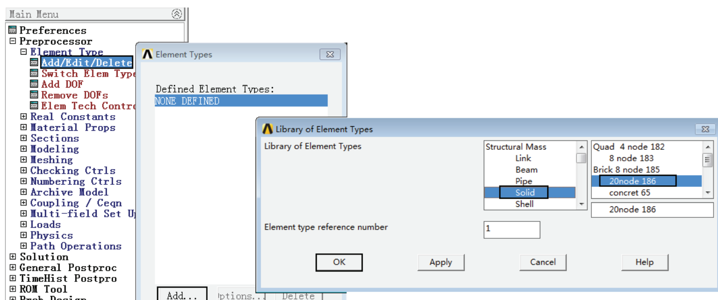


图 3-112　选择单元

Step5：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，在弹出的对话框中单击 Size Controls→Lines→Set 按钮，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，此时弹出图 3-113 所示的对话框，在对话框中执行操作：

在 NDIV No. of element divisions 栏中输入 20，划分 20 份，单击 OK 按钮。

Step6：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 命令，在弹出的对话框中单击 Mesh 按钮，在弹出的对话框中单击 Pick All 按钮，划分完的网格如图 3-114 所示。

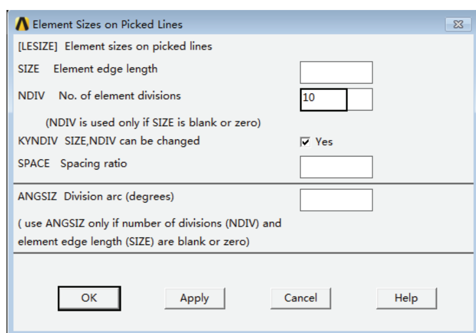


图 3-113　网格数量

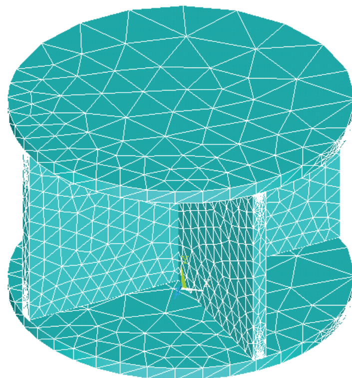


图 3-114　划分完的网格

Step7：依次选择 Main Menu→Preprocessor→Archive Model→Write 命令，在弹出的对话框中单击...按钮，在弹出的对话框中输入文件名为 CDB2FEM，单击保存按钮，单击 OK 按钮，完成几何及网格文件的保存，如图 3-115 所示。

注意：保存的网格有可能是 file 文件名，请读者注意，文件的路径在启动目录中。

Step8：关闭 ANSYS 16.0。

Step9：启动 ANSYS Workbench16.0 平台。

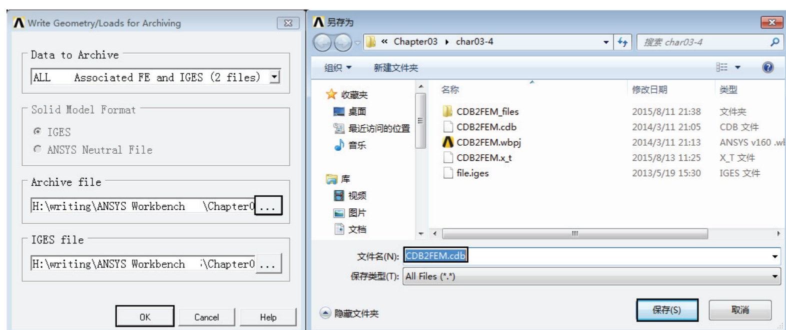


图 3-115　网格保存

Step10：依次选择 Toolbox→Component Systems→Finite Element Modeler 模块，直接拖拽到 Project Schematic 项目管理窗口中，如图 3-116 所示。

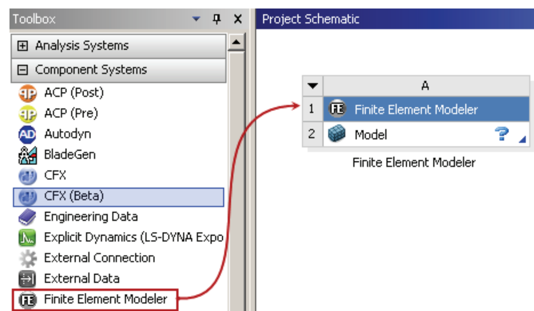


图 3-116　Finite Element Modeler 模块

Step11：右键单击 A2（Model），在弹出的快捷菜单中选择 Add Input Mesh→Browse 命令，在弹出的图 3-117 所示的对话框中进行如下选择。

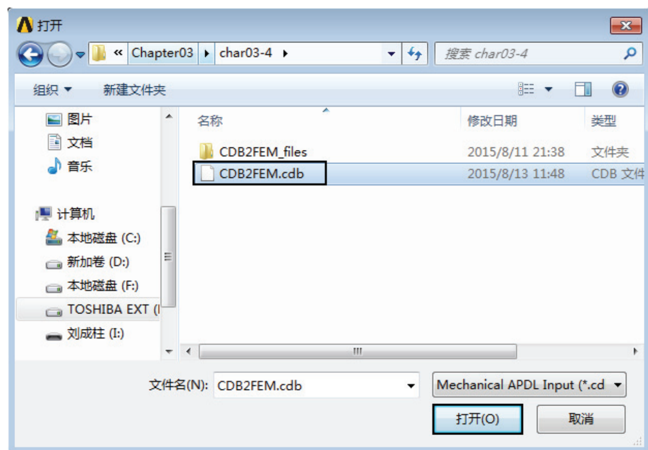


图 3-117　打开文件

在文件类型栏中选择 Mechanical APDL Input 选项。

选择 CDB2FEM.cdb 文件并单击“打开”按钮。

注意：ANSYS 16.0 默认的输出文件目录在“系统盘”→Documents and Settings→“用户名”目录下，如果 CDB2FEM.cdb 找不到，请到上述目下找 file.cdb 即可。

Step12：双击 A2（Model），此时会弹出图 3-118 所示的 Finite Element Modeler 窗口，在此窗口中可以进行有限元网格的各种操作。

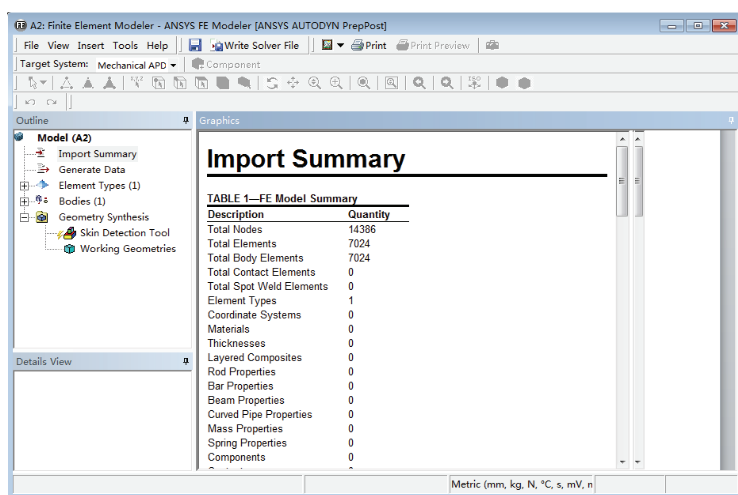


图 3-118　Finite Element Modeler 窗口

Step13：依次选择 Outline→Model（A2）→Geometry Synthesis 命令，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Initial Geometry 命令，计算完成后生成图 3-119 所示的几何模型。

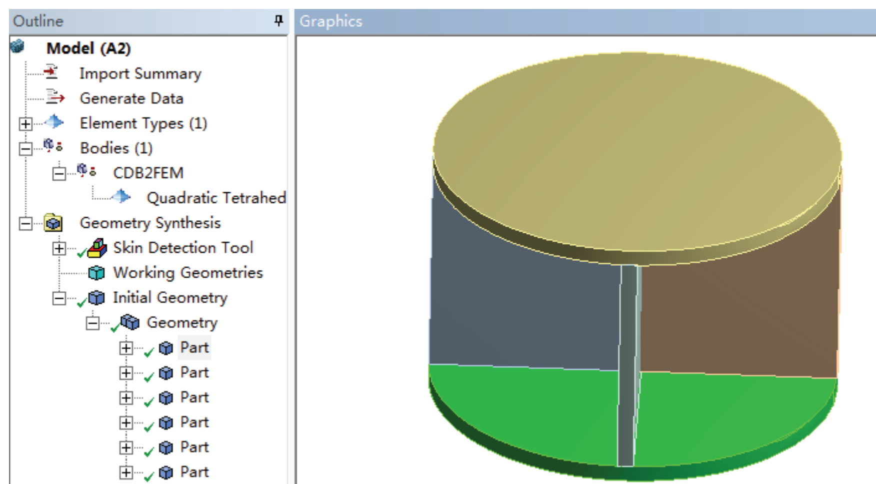


图 3-119　几何模型

Step14：依次选择 Outline→Model（A2）→Geometry Synthesis→Skin Detection Tool 命令，将显示图 3-120 所示的几何所有面的面网格模型。

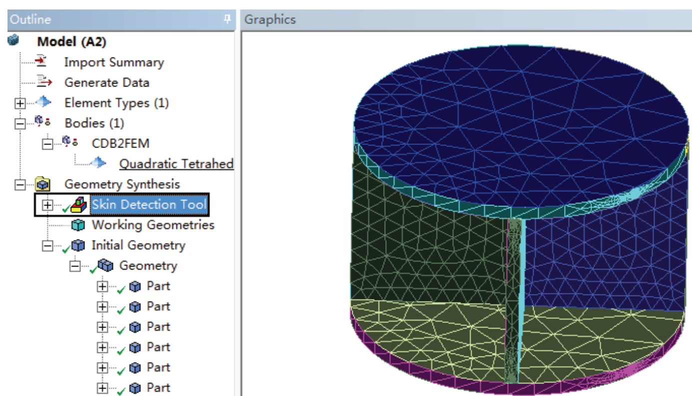


图 3-120 面网格模型

Step15：依次选择 Outline→Model（A2）→CDB2FEM→Quadratic Tetrahed 命令，将显示图 3-121 所示的网格模型。

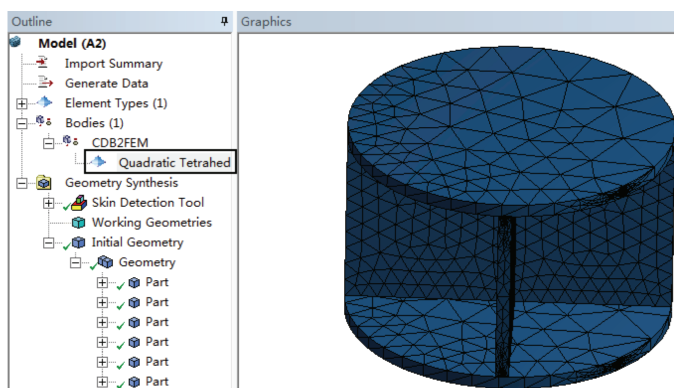


图 3-121 网格模型

Step16：关闭 Finite Element Modeler 平台，这里不对 Finite Element Modeler 有限元处理平台进行过多介绍，请读者参考帮助文档进行学习。

Step17：回到 Workbench 工程管理界面，拖动一个 Linear Buckling 到 A2 中，Update 一下 A2 即可，如图 3-122 所示，此时就可以进入到 Mechanical 模块进行有限元分析，这里不多介绍。

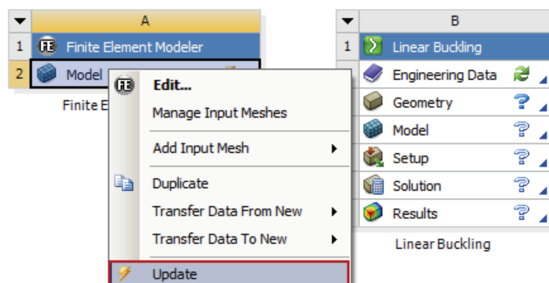


图 3-122 项目管理

Step18：保存文件名为 CDB2FEM.wbpj，关闭 Workbench 平台。

通过以上的操作步骤读者应该对网格导入的方法有了一个比较详细的了解，尽管实例比较简单，但是大同小异，操作步骤是一样的。

3.3 小结

本章详细介绍了 ANSYS Workbench 平台网格划分模块的一些相关参数设置与网格质量检测方法，并通过 3 个网格划分实例介绍了不同类型网格划分的方法及操作过程，最后通过两个实例介绍了外部网格的导入方法。



第4章 后 处 理

后处理技术——以其对计算数据优秀的处理能力，被众多有限元计算软件所应用。结果的输出为了方便对计算数据的处理而产生，减少了对大量数据的分析过程，可读性强，理解方便。

有限元计算的最后一个关键步骤为数据的后处理，在后处理阶段，使用者可以很方便地对结构的计算结果进行相关操作，以输出感兴趣的结果，如变形、应力、应变等，另外，对于一些高级用户，还可以通过简单的代码编写输出一些特殊的结果。

ANSYS Workbench 16.0 平台的后处理器功能非常强大，可以完成众多类型的后处理，本章将详细介绍 ANSYS Workbench 16.0 新版软件的后处理设置与操作方法。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
ANSYS Workbench 后处理的意义		√		
ANSYS Workbench 后处理工具使用方法			√	√
ANSYS Workbench 用户自定义后处理			√	√
ANSYS Workbench 后处理数据判断方法			√	√

4.1 ANSYS Workbench 16.0 后处理

Workbench 平台的后处理包括以下几部分内容：查看结果、显示结果（Scope Results）、输出结果、坐标系和方向解、结果组合（Solution Combinations）、应力奇异（Stress Singularities）、误差估计和收敛状况等。

4.1.1 查看结果

当选择一个结果选项时，文本工具框就会显示该结果所要表达的内容，如图 4-1 所示。



图 4-1 结果选项卡

1）缩放比例：对于结构分析（静态、模态、屈曲分析等），模型的变形情况将发生变化，默认状态下，为了更清楚地看到结构的变化，比例系数自动被放大，同时用户可以改变为非变形或者实际变形情况，如图 4-2 所示设置比例因子。同时可以手动输入比例因子，如图 4-3 所示。

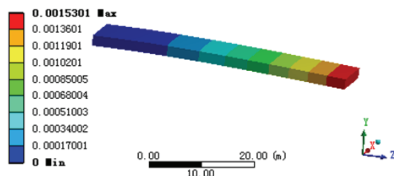


图 4-2　默认比例因子

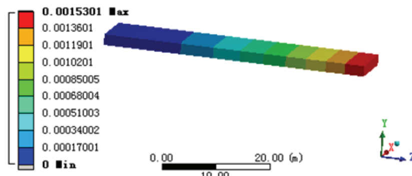


图 4-3　输入比例因子

2）显示方式：几何按钮控制云图显示方式，共有 4 种可供选择的选项。

- Exterior：默认的显示方式并且是最常使用的方式，如图 4-4 所示。
- IsoSurface：对于显示相同的值域是非常有用的，如图 4-5 所示。

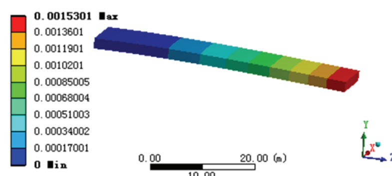


图 4-4　Exterior 方式

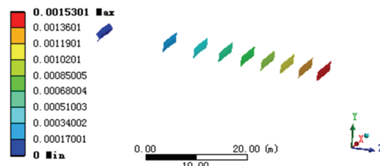


图 4-5　IsoSurface 方式

- Capped IsoSurface：指删除了模型的一部分之后的显示结果，删除的部分是可变的，高于或者低于某个指定值的部分被删除，如图 4-6 和图 4-7 所示。
- Slice Planes：允许用户去真实地切模型，需要先创建一个界面然后显示剩余部分的云图，如图 4-8 所示。

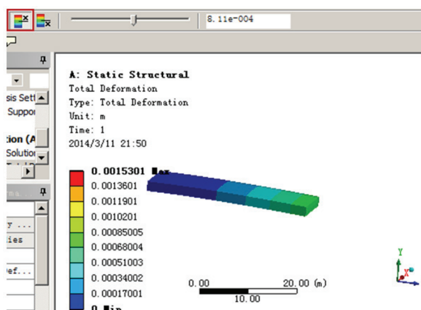


图 4-6　Capped IsoSurface 方式 1

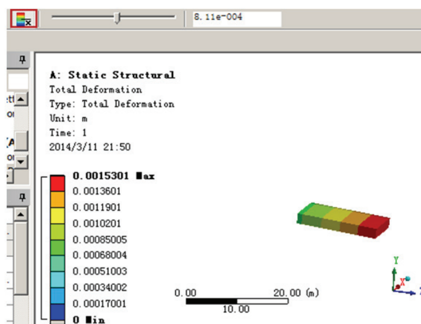


图 4-7　Capped IsoSurface 方式 2

3）色条设置：Contour 按钮可以控制模型的显示云图方式。

- Smooth Contour：光滑显示云图，颜色变化过渡变焦光滑，如图 4-9 所示。

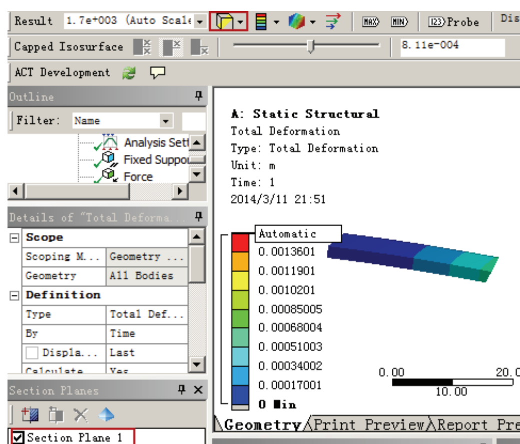


图 4-8 Slice Planes 方式

● Contour Bands：云图显示有明显的色带区域，如图 4-10 所示。

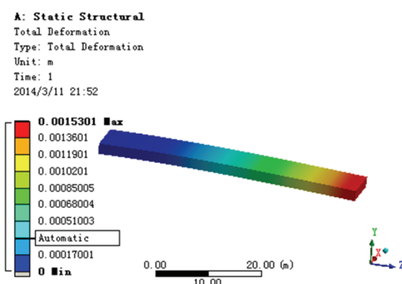


图 4-9 Smooth Contour 方式

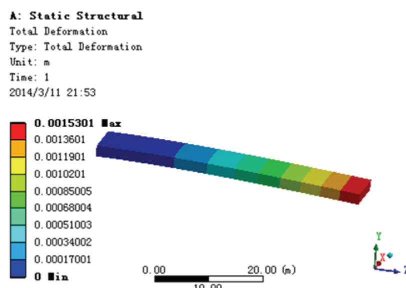


图 4-10 Contour Bands 方式

● Isolines：以模型等值线方式显示，如图 4-11 所示。

● Solid Fill：不在模型上显示云图，如图 4-12 所示。

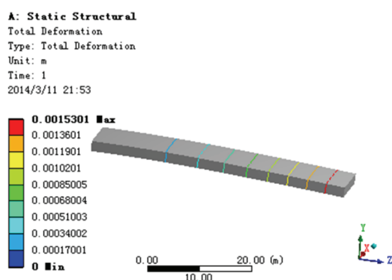


图 4-11 Isolines 方式

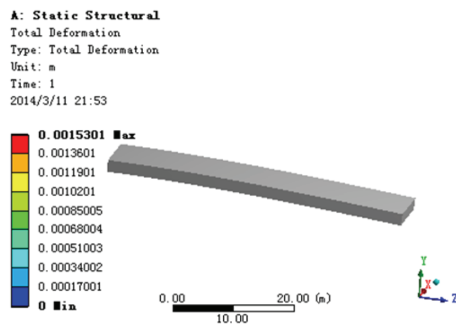


图 4-12 Solid Fill 方式

4）外形显示：Edge 按钮允许用户显示未变形的模型或者划分网格的模型。

● No WireFrame：不显示几何轮廓线，如图 4-13 所示。

● Show Underformed WireFrame：显示未变形轮廓，如图 4-14 所示。

● Show Underformed Model：显示未变形的模型，如图 4-15 所示。

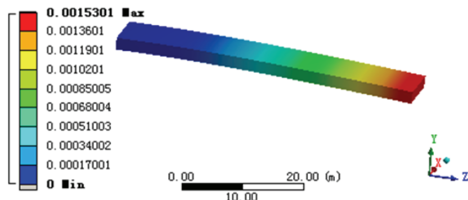


图 4-13　No WireFrame 方式

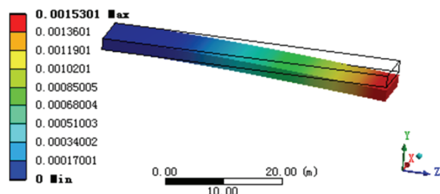


图 4-14　Show Underformed WireFrame 方式

- Show Element：显示单元，如图 4-16 所示。

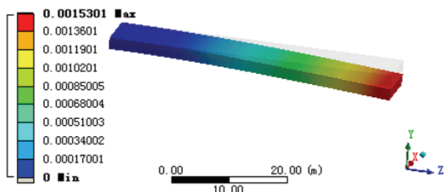


图 4-15　Show Underformed Model 方式

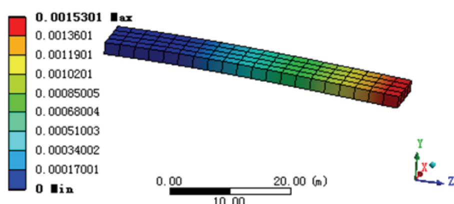


图 4-16　Show Element 方式

5）最大值显示、最小值显示与刺探工具：单击相应按钮此时在图形中将显示最大值最小值和刺探位置的数值。

4.1.2 结果显示

在后处理中，读者可以指定输出的结果，软件默认的输出结果以静力计算为例有图 4-17 所示的一些类型，其他分析结果请读者自行查看，这里不再赘述。

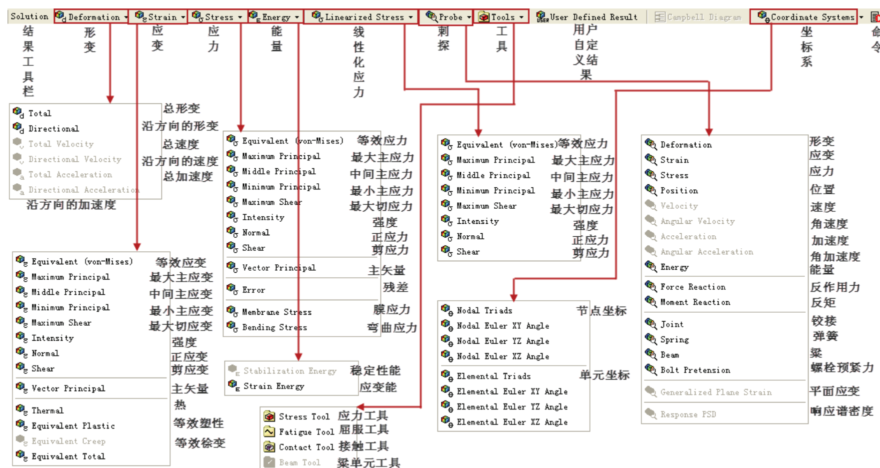


图 4-17　后处理输出结果类型

4.1.3 变形显示

在 Workbench Mechanical 的计算结果中，可以显示模型的变形量，主要包括 Total 及 Directional，如图 4-18 所示。

1）Total（整体变形）：整体变形是一个标量，它由下式决定：

$$U_{\text{tatal}}=\sqrt{U_x^2+U_y^2+U_z^2}$$

2）Directional（方向变形）：包括 x、y 和 z 方向上的变形，它们是在 Directional 中指定的，并显示在整体或局部坐标系中。

3）变形矢量图：Workbench 中可以给出变形的矢量图，表明变形的方向，如图 4-19 所示。

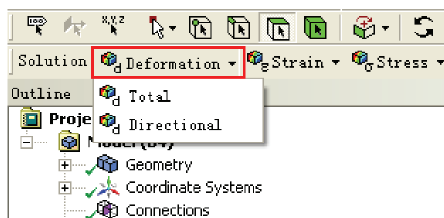


图 4-18　变形量分析选项

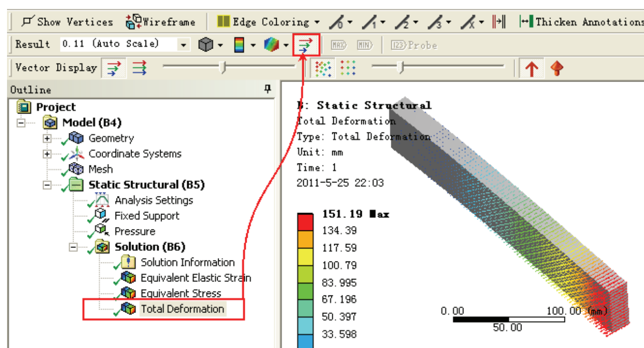


图 4-19　变形矢量形式

4.1.4 应力和应变

在 Workbench Mechanical 有限元分析中给出的应力 Stress 和应变 Strain 如图 4-20 和图 4-21 所示，这里 Strain 实际上指的是弹性应变。

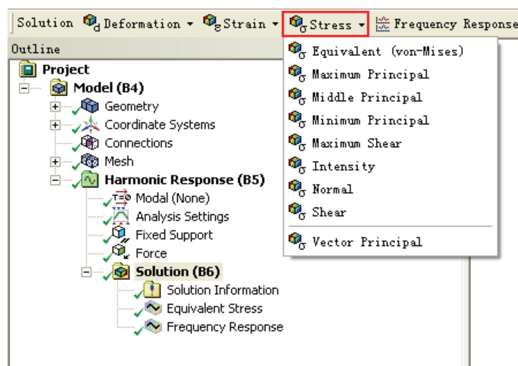


图 4-20　应力分析选项

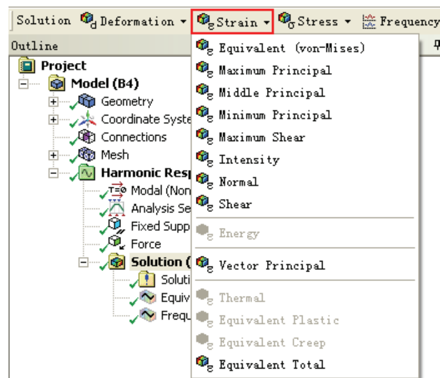


图 4-21　应变分析选项

在分析结果中，应力和应变有 6 个分量（x、y、z、xy、yz、xz），热应变有 3 个分量（x、y、z）。对应力和应变而言其分量可以在 Normal（x、y、z）和 Shear（xy、yz、xz）下指定，而热应变是在 Thermal 中指定的。

由于应力为一张量，因此单从应力分量上很难判断出系统的响应，在 Mechanical 中可以利用安全系数对系统响应做出判断，它主要取决于所采用的强度理论。使用每个安全系数的应力工具都可以绘制出安全边界及应力比。

应力工具（Stress Tool）可以利用 Mechanical 的计算结果，操作时在 Stress Tool 下选择合适的强度理论即可，如图 4-22 所示。

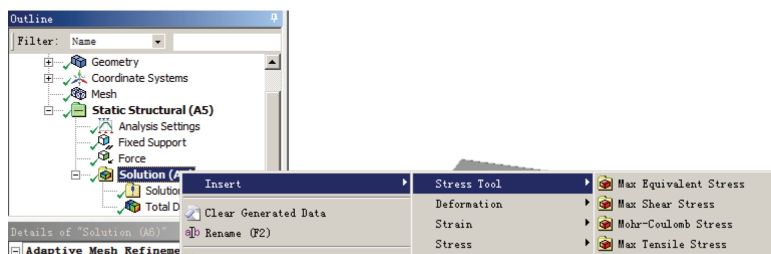


图 4-22　应力分析工具

最大等效应力理论及最大剪切应力理论适用于塑性材料（Ductile），Mohr-Coulomb 应力理论及最大拉应力理论适用于脆性材料（Brittle）。

其中等效应力 Max Equivalent Stress 为材料力学中的第四强度理论，定义为：

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\right]}$$

最大剪应力 Max Shear Stress 定义为 $\tau_{\max}=\dfrac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$，对于塑性材料 $\tau_{\max}$ 与屈服强度相比可以用来预测屈服极限。

4.1.5 接触结果

在 Workbench Mechanical 中选择 Solution→Tools→Contact Tool（接触工具），如图 4-23 所示，可以得到接触分析结果。

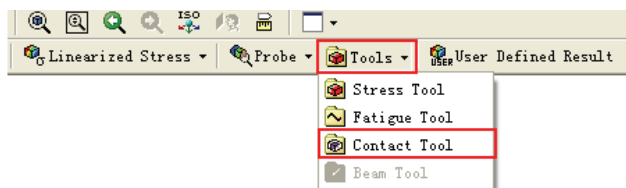


图 4-23　接触分析工具

接触工具下的接触分析可以求解相应的接触分析结果，包括摩擦应力、接触压力、滑动距离等计算结果，如图 4-24 所示。为 Contact Tool 选择接触域有 2 种方法：

1）Worksheet view（details）：从表单中选择接触域，包括接触面、目标面或同时选

择两者。

2）Geometry：在图形窗口中选择接触域。

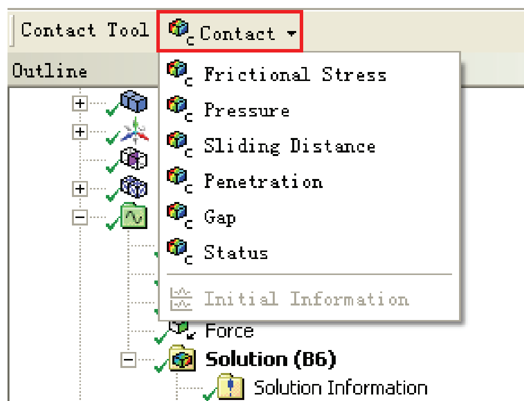


图 4-24 接触分析选项

关于接触的相关内容在后面有单独的介绍，这里不再赘述。

4.1.6 自定义结果显示

在 Workbench Mechanical 中，除了可以查看标准结果外，还可以根据需要插入自定义结果，可以包括数学表达式和多个结果的组合等。自定义结果显示有两种方式：

1）选择 Solution→User Defined Result，如图 4-25 所示。



图 4-25 Solution 菜单

2）在 Solution Worksheet 中选中结果后单击鼠标右键，选择弹出的 Create User Defined Result 即可，如图 4-26 所示。

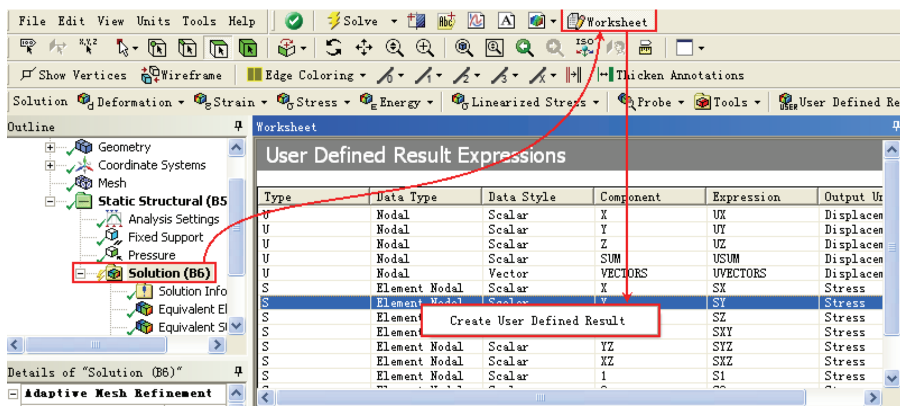


图 4-26 Solution Worksheet 中定义结果显示

在自定义结果显示参数设置列表中，表达式允许使用各种数学操作符号，包括平方根、

绝对值、指数等，如图 4-27 所示。

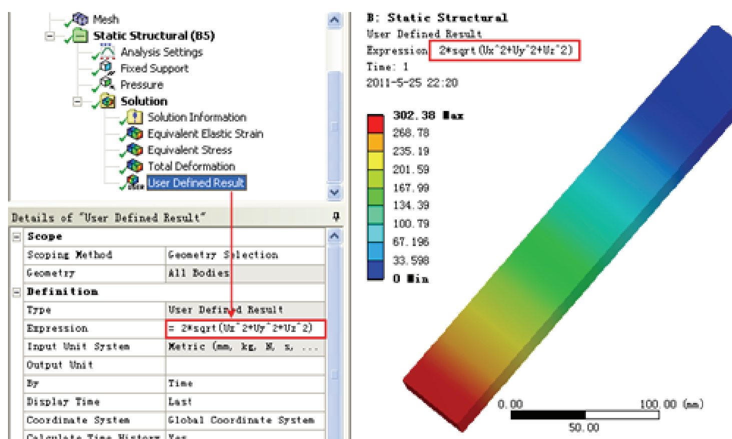


图 4-27　自定义结果显示

4.2　案例分析

前面一节介绍了一般后处理的常用方法及步骤，下面通过一个简单的案例讲解一下后处理的操作方法。

4.2.1　问题描述

图 4-28 所示铝合金模型，请用 ANSYS Workbench 分析作用在侧面的压力为 11000N 时，中间圆杆的变形及应力分布。

4.2.2　启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 4-29 所示。

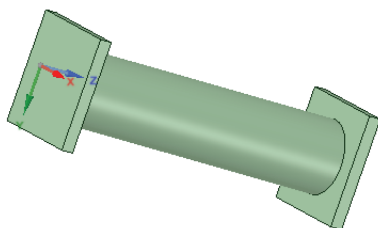


图 4-28　铝合金模型

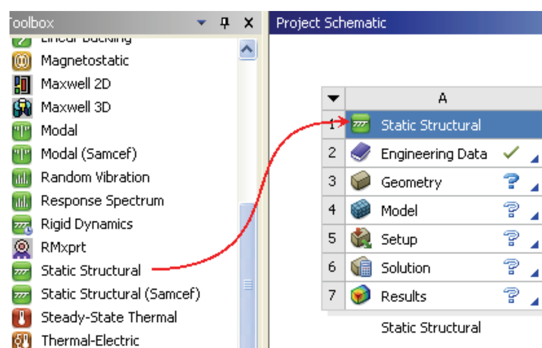


图 4-29　创建分析项目 A

4.2.3 导入创建几何体

Step1： 在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 4-30 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2： 在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 Part.stp 几何体文件，如图 4-31 所示，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

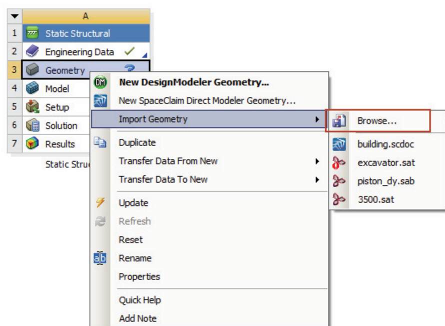


图 4-30 导入几何体

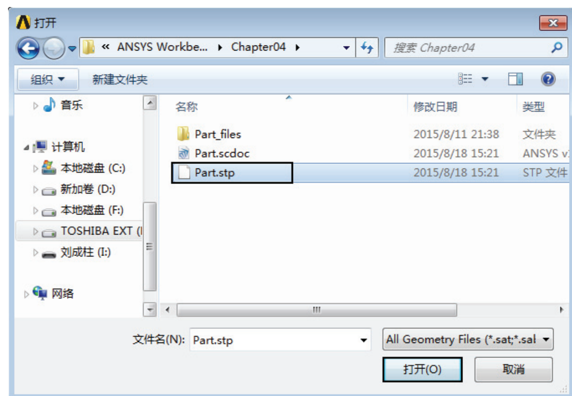


图 4-31 “打开”对话框

Step3： 双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，选择单位为 mm，单击 OK 按钮，此时设计树种 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 4-32 所示。

Step4： 单击⚡Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 4-33 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无须进行操作。

Step5： 单击 DesignModeler 界面右上角的❌（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

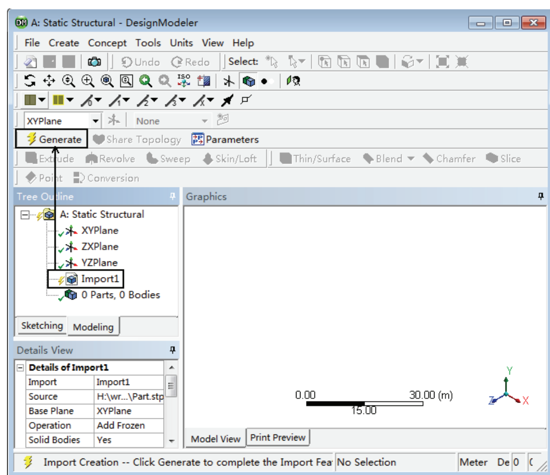


图 4-32 生成前的 DesignModeler 界面

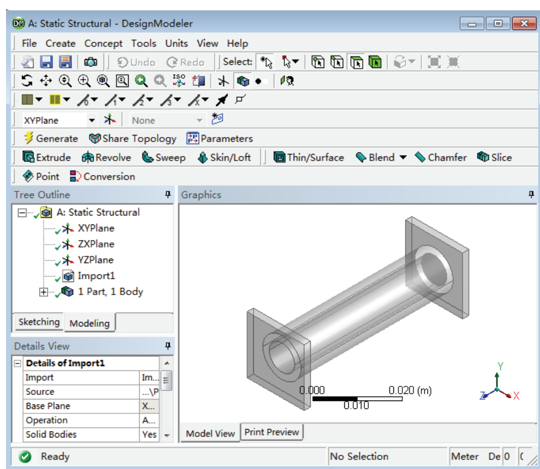


图 4-33 生成后的 DesignModeler 界面

4.2.4 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 项，进入图 4-34 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

Step2：在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），此时的界面会变为图 4-35 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

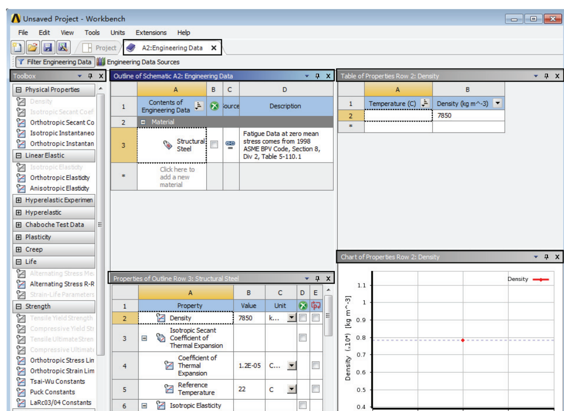


图 4-34　材料参数设置界面 1

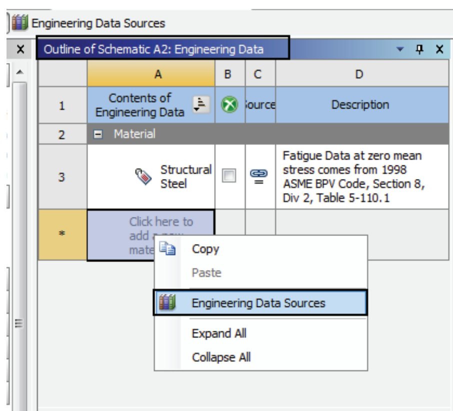


图 4-35　材料参数设置界面 2

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of Favorites 表中 A4 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B4 栏的（添加）按钮，此时在 C4 栏中会显示（使用中的）标识，如图 4-36 所示，标识材料添加成功。

Step4：同 **Step2**，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

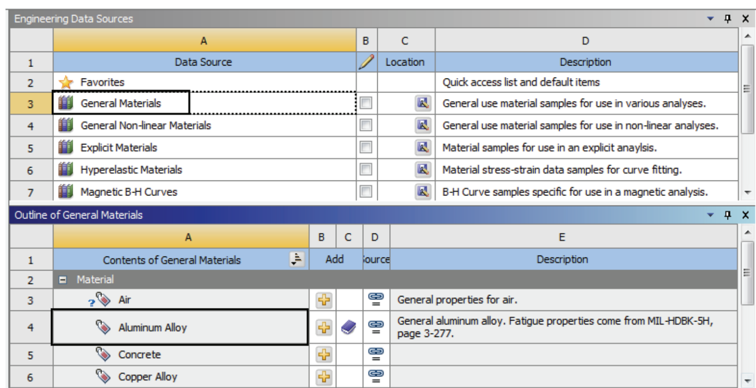


图 4-36　添加材料

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 4:Aluminum Alloy 表中可以修改材料的特性，如图 4-37 所示，本实例采用的是默认值。

提示：用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

Outline of General Materials

	A	B	C	E
1	Contents of General Materials	Add		Description
2	Material			
3	Air			General properties for air.
4	Aluminum Alloy			General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Properties of Outline Row 4: Aluminum Alloy

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2770	kg m^-3
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...	
8	Young's Modulus	7.1E+10	Pa
9	Poisson's Ratio	0.33	
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa
12	Alternating Stress R-Ratio	Tabular	
16	Tensile Yield Strength	2.8E+08	Pa
17	Compressive Yield Strength	2.8E+08	Pa
18	Tensile Ultimate Strength	3.1E+08	Pa
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

图 4-37　材料属性窗口

Step6： 单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

4.2.5 添加模型材料属性

Step1： 双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏的 Model 选项，进入图 4-38 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置。结果观察等操作。

提示：ANSYS Workbench 16.0 程序默认的材料为 Structural Steel。

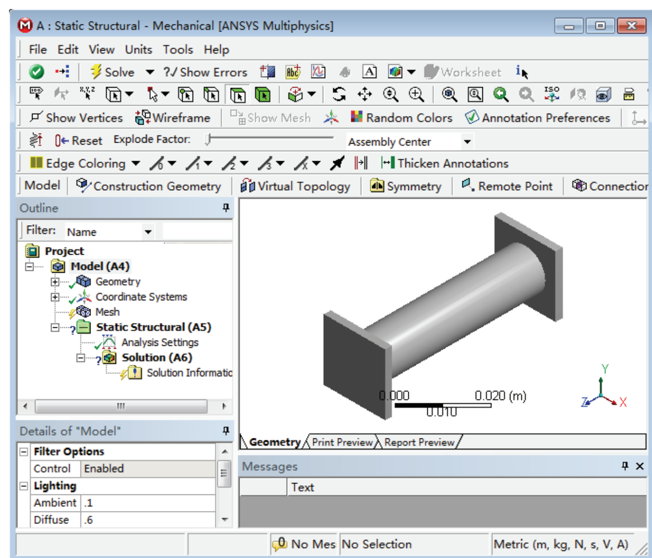


图 4-38　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→1，此时即可在 Details of “1”（参数列表）中给模型添加材料，如图 4-39 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material→Assignment→▸按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminum Alloy，选择即可将其添加到模型中去。如图 4-40 所示，表示材料已经添加成功。

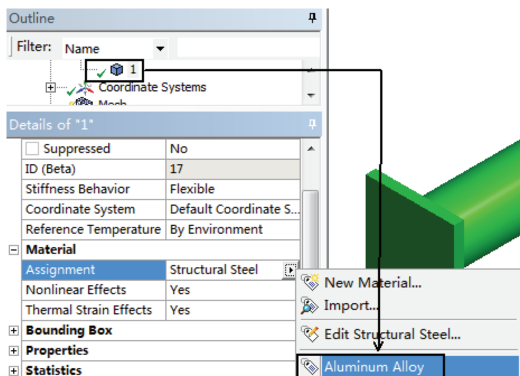


图 4-39　变更材料

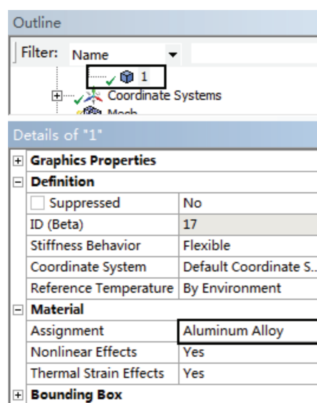


图 4-40　修改材料后的分析树

4.2.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例中在 Sizing 中的 Element Size 中设置为 5.e-004m，其余采用默认设置，如图 4-41 所示。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 4-42 所示。

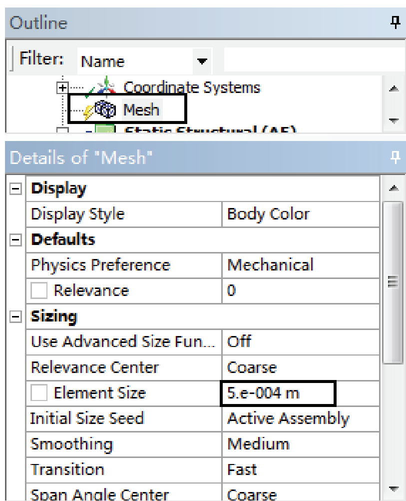


图 4-41　生成网格设置

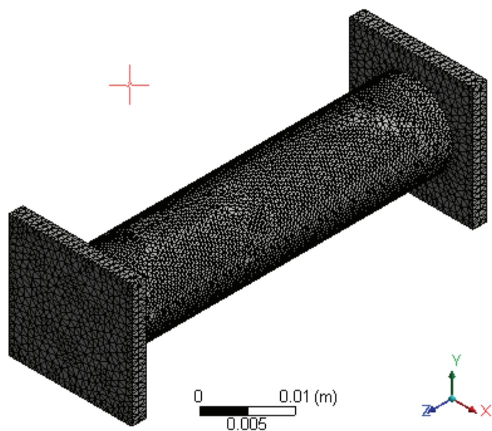


图 4-42　最终网格效果

4.2.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A5）选项，此时会出现图 4-43 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 4-44 所示。

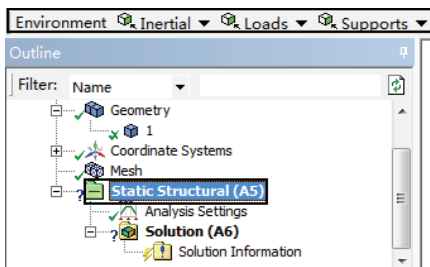


图 4-43　Environment 工具栏

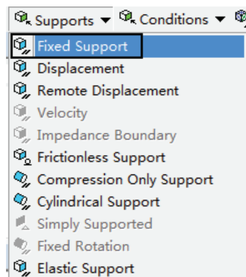


图 4-44　添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of "Static Structural（A5）"（参数列表）→Geometry→ Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 4-45 所示。

Step4：如同 Step2 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 4-46 所示。

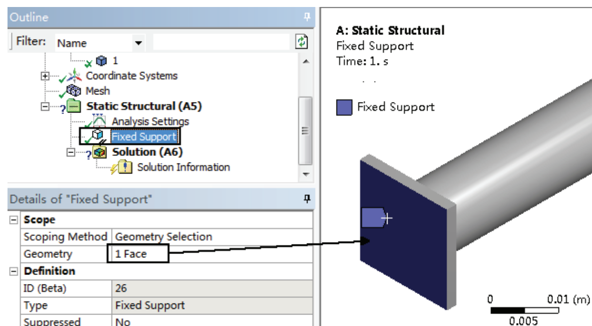


图 4-45　施加固定约束

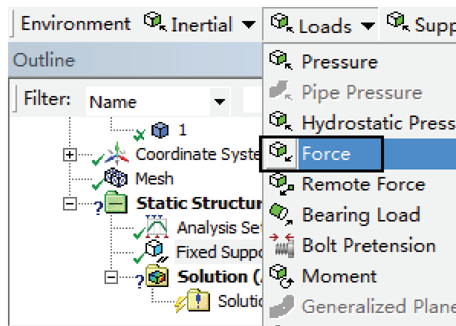


图 4-46　添加力

Step5：选中 Force，在 Details of "Force"（参数列表）面板中进行如下设置及输入。

在 Geometry 选项下确保图 4-47 所示的面被选中并单击 Apply 按钮，此时在 Geometry 栏中显示 1Face，表明一个面已经被选中。

在 Define By 选项栏中选择 Components。

在 Y Component 栏中输入 11000N，保持其他选项默认即可。

Step6：在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 4-48 所示。

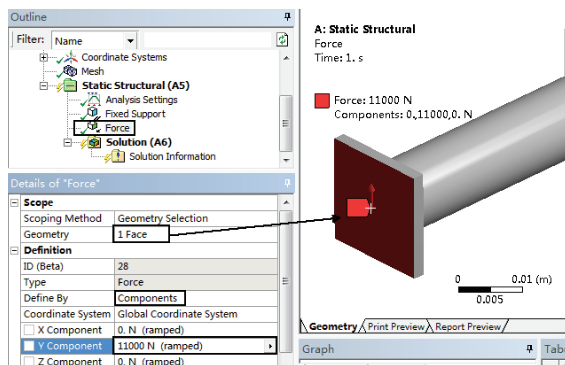


图 4-47　添加面载荷

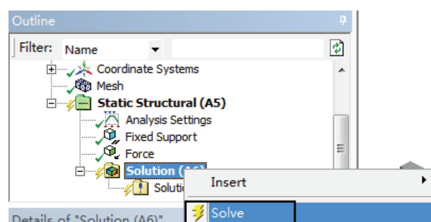


图 4-48　选择 solve 命令

4.2.8 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 4-49 所示的 Solution 工具栏。

Step2： 选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 4-50 所示。

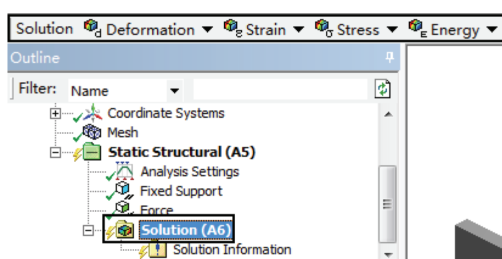


图 4-49　Solution 工具栏

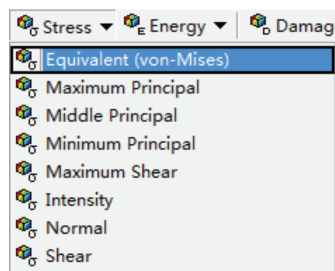


图 4-50　添加等效应力选项

Step3： 如同 Step2，选择 Solution→Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 4-51 所示，此时在分析树种会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

Step4： 如同 Step2，选择 Solution→Deformation（变形）→Total 命令，如图 4-52 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

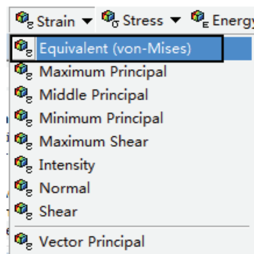


图 4-51　添加等效应变选项

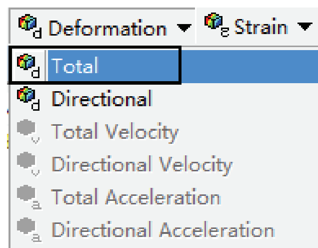


图 4-52　添加总变形选项

Step5： 在 Outlines（分析树）→Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 4-53 所示。

Step6： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Equivalent Stress 选项，此时会出现图 4-54 所示的应力分析云图。

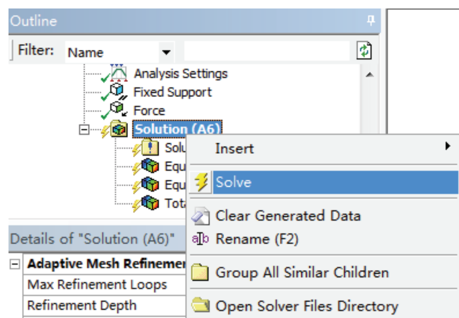


图 4-53 快捷菜单

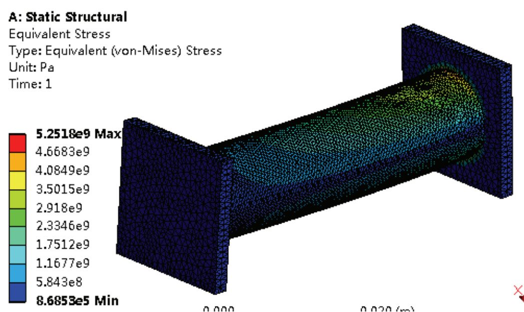


图 4-54 应力分析云图 1

Step7： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Equivalent Elastic Strain 选项，此时会出现图 4-55 所示的应变分析云图。

Step8： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Total Deformation（总变形），此时会出现图 4-56 所示的总变形分析云图。

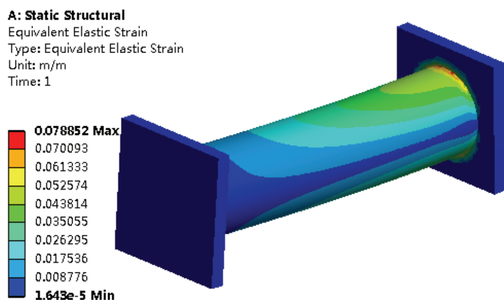


图 4-55 应变分析云图 2

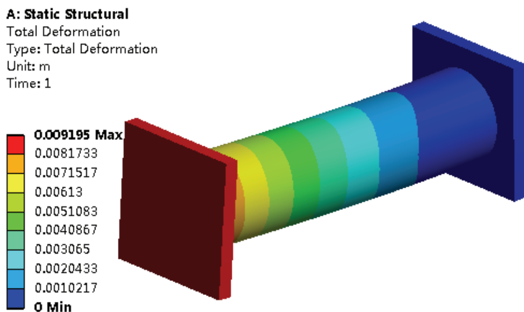


图 4-56 总变形分析云图 1

Step9： 选择工具栏中的 命令下的 Smooth Contours 命令，此时分别显示应力、应变及位移，如图 4-57～图 4-59 所示。

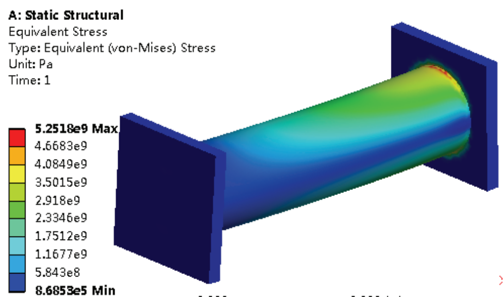


图 4-57 应力分析云图 3

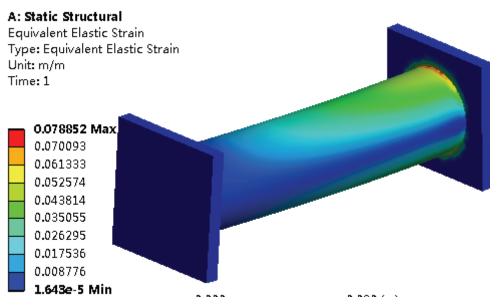


图 4-58 应变分析云图 4

Step10：选择工具栏中的▤▾命令下的Isolines命令，此时分别显示应力、应变及位移如图 4-60～图 4-62 所示。

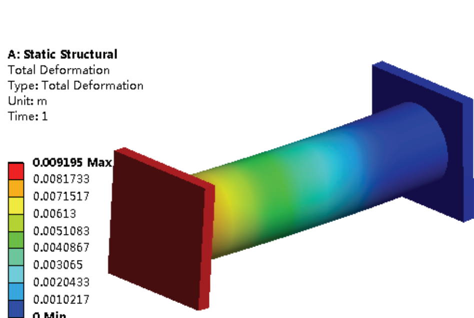


图 4-59　总变形分析云图 2

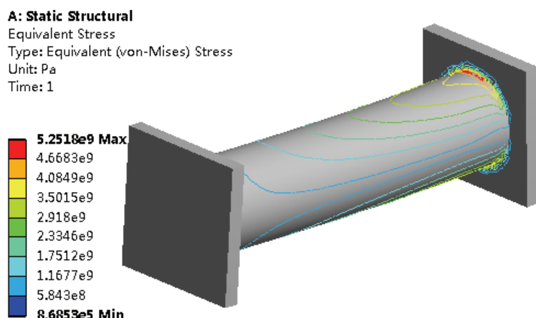


图 4-60　应力分析线图 1

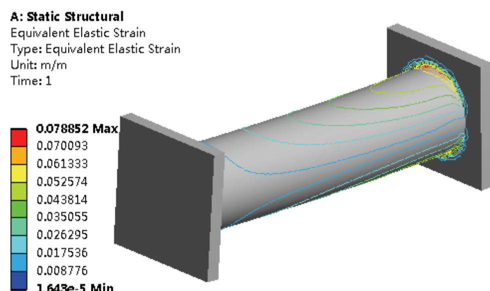


图 4-61　应变分析线图 2

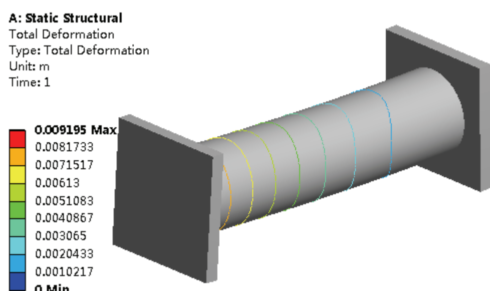


图 4-62　总变形线图

Step11：选择 Solution（C4）命令，单击工具栏中的Worksheet按钮，选择 List Result Summary 选项，此时绘图窗口中会弹出图 4-63 所示的列表。

Solution Quantities and Result Summary

○ List Available Solution Quantities

◉ List Result Summary

Results	Minimum	Maximum	Uni...	Time (s)
Equivalent Stress	8.6853e+005	5.2518e+009	Pa	1.
Equivalent Elastic Strain	1.643e-005	7.8852e-002	m/m	1.
Total Deformation	0.	9.195e-003	m	1.

图 4-63　后处理列表

Step12：选择 List Available Solution Quantities 选项，此时绘图窗口显示图 4-64 所示的列表。

Step13：选择 ENERGY 选项，并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create User Defined Result 选项，此时时绘图窗口显示图 4-65 所示的列表。

Step14：此时在 Outline 列表框中出现 ENERGYPOTENTIAL 选项，并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Equivalent All Results，此时绘图窗口会显示图 4-66 所示的云图。

图 4-64 可列的后处理选项

图 4-65 选择项

图 4-66 云图

Step15：选择 Solution（C4）命令，单击工具栏中的

按钮，此时出现图 4-67 所示的 Details of “Defined Result”窗口，在窗口的 Expression 栏中输入如下关系式。

2×sqrt(Ux^3)，并计算此时将显示图 4-68 所示的云图。

图 4-67 设置

图 4-68 自定义云图

4.2.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，在文件名中输入 Part 保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

4.3 本章小结

本章以有限元分析的一般过程为总线，分别介绍了 ANSYS Workbench 16.0 几何建模的方法及集成在 Workbench 平台上的 DesignModeler 几何建模工具的建模方法，另外，通过 4 个应用实例讲解了在 Workbench 平台中网格的划分与导入方法。最后，简单介绍了 Workbench 平台上 Mechanical 的后处理功能。

第 2 篇

第 5 章 结构静力学分析

结构静力学分析是有限元分析中最简单也是最基础的分析方法，一般工程计算中最经常应用的分析方法就是静力分析。

本章首先对静力分析一般原理进行介绍，然后通过几个典型实例对 ANSYS Workbench 软件的结构静力学分析模块进行详细讲解，讲解分析的一般步骤包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
外部数据导入	√			√
ANSYS Workbench 支持几何数据格式		√	√	√
ANSYS Workbench 材料定义		√	√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 边界条件设置			√	√
ANSYS Workbench 后处理的设置			√	√

5.1 静力分析简介

静力分析是最基本但又是应用最广的一类分析类型，用于线弹性材料的静态加载情况。

线性分析有两方面的含义：首先就是材料为线性，应力应变关系为线性，变形是可恢复的；结构发生的是小位移、小应变、小转动，结构刚度不因变形而变化。

线性分析除了有线性静力分析外，还包括线性动力分析，而线性动力分析又包括以下几种典型的分析：模态分析、谐响应分析、随机振动分析、响应谱分析、瞬态动力学分析及线性屈曲分析。

与线性分析相对应的就是非线性分析，非线性分析主要分析的是大变形等分析。ANSYS Workbench 16.0 平台可以很容易地完成以上任何一种分析及任意几种类型分析的联合计算。

5.1.1 线性静力分析

所谓静力就是结构受到静态荷载的作用，惯性和阻尼可以忽略，在静态载荷作用下，结构处于静力平衡状态，此时必须充分约束，但由于不考虑惯性，则质量对结构没有影响，但是很多情况下，如果荷载周期远远大于结构自振周期（即缓慢加载），则结构的惯性效应能

够忽略，这种情况可以简化为线性静力分析来进行。

ANSYS Workbench 16.0 的线性静力分析可以将多种载荷组合到一起进行分析，即可以进行多工况的力学分析。

图 5-1 所示为 ANSYS Workbench 16.0 平台进行静力分析的分析环境项目流程图，其中项目 A 为利用 ANSYS 软件自带求解器进行静力分析的流程卡，项目 B 为利用 ABAQUS 软件求解器进行静力分析的流程卡，项目 C 为利用 Samcef 软件求解器进行静力分析的流程卡。

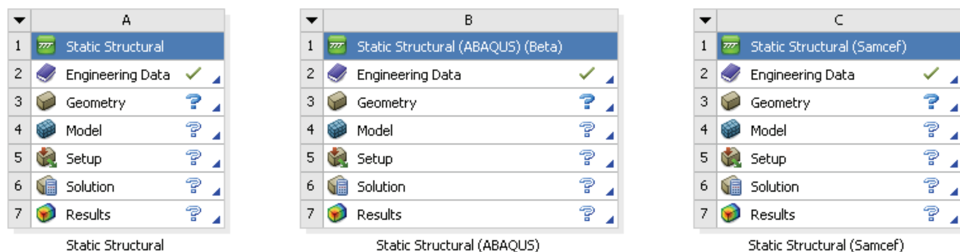


图 5-1　静力分析流程

在项目 A 中有 A1～A7 共 7 个表格（如同 Excel 表格），从上到下依次设置即可完成一个静力分析过程，具体如下。

A1 Static Structural (Samcef)：静力分析求解器类型，即求解的类型和求解器的类型。

A2 Engineering Data：工程数据，即材料库，从中可以选择和设置工程材料。

A3 Geometry：几何数据，即几何建模工具或者导入外部几何数据平台。

A4 Model：前处理，即几何模型材料赋予和网格设置与划分平台。

A5 Setup：建立有限元分析，即求解计算有限元分析模型。

A6 Solution：求解，对建立完成的有限元模型进行分析。

A7 Results：后处理，即完成应力分布及位移响应等云图的显示。

5.1.2 线性静力分析流程

如图 5-2 所示的静力分析流程，每个表格右侧都有一个提示符号，如对号（√）、问号（？）等，图 5-3 所示为在流程分析过程遇到的各种提示符号及解释。

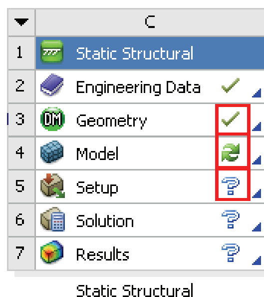


图 5-2　静力分析流程

• 无法执行:缺少数据。

• 需要注意：需要修正或更新板块。

• 需要刷新：上行数据发生了变化。需要刷新板块（更新也会刷新板块）。

• 需要更新：数据已更改，必须重新生成板块的输出。

• 数据确定。

• 输入变化：板块需要局部更新，但当下一个执行更新是由于上游的改变时可能会发生变化。

图 5-3　提示符含义

5.1.3 线性静力分析基础

由经典力学理论可知，物体的动力学通用方程是：

$$[M]\{x''\}+[C]\{x'\}+[K]\{x\}=\{F(t)\}$$

式中，$[M]$是质量矩阵；$[C]$是阻尼矩阵；$[K]$是刚度矩阵；$\{x\}$是位移矢量；$\{F(t)\}$是力矢量；$\{x'\}$是速度矢量；$\{x''\}$是加速度矢量。

而现行结构分析中，与时间t相关的量都将被忽略，于是上式简化为：

$$[K]\{x\}=\{F\}$$

下面通过几个简单的实例介绍一下静力分析的方法和步骤。

5.2 静力分析实例1——实体静力分析

本节主要介绍用 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 模块导入外部几何模型的功能，并对其进行静力分析。

学习目标：

1）熟练掌握 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 模块导入外部几何模型的方法，了解 DesignModeler 模块支持外部几何模型文件的类型。

2）掌握 ANSYS Workbench 实体单元静力学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter05\char05-1\Bar.stp
结果文件	网盘\Chapter05\char05-1\SolidStaticStructure.wbpj

5.2.1 问题描述

如图 5-4 所示的铝合金模型，请用 ANSYS Workbench 分析作用在上端面的压力为 11000N 时，中间圆杆的变形及应力分布。

5.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-5 所示。

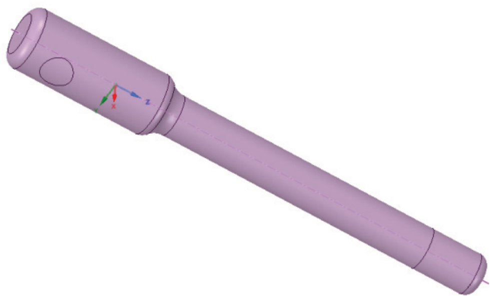


图 5-4 铝合金模型

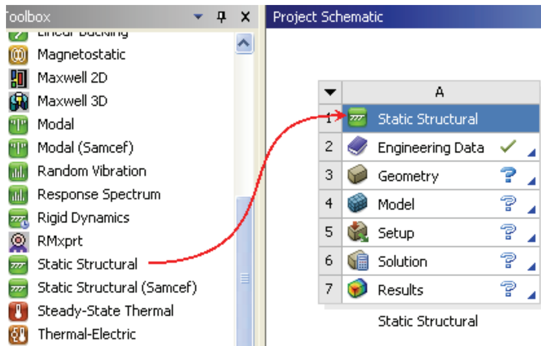


图 5-5 创建分析项目 A

5.2.3 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→“Browse”命令，如图 5-6 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 Bar.stp 几何体文件，如图 5-7 所示，此时 A3Geometry 后的 变为 ，表示实体模型已经存在。

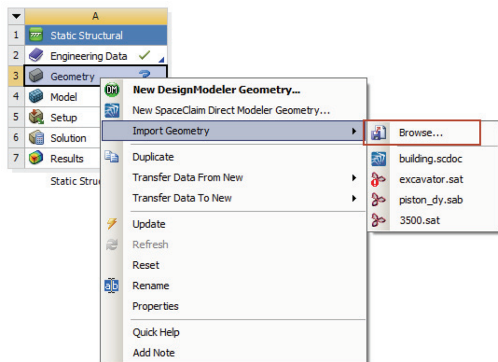


图 5-6　导入几何体

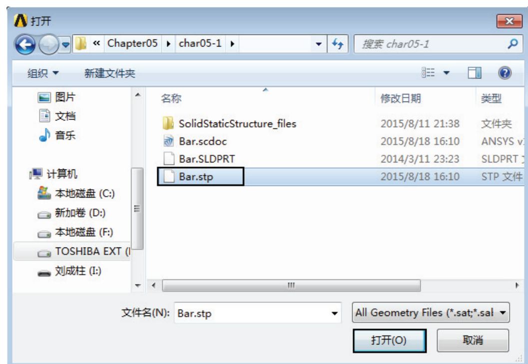
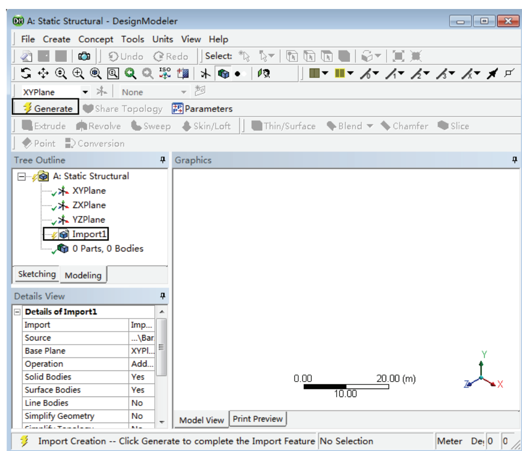


图 5-7　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，选择单位为 mm，单击 OK 按钮，此时设计树种 Import1 前显示 ，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 5-8 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 5-9 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无须进行操作。



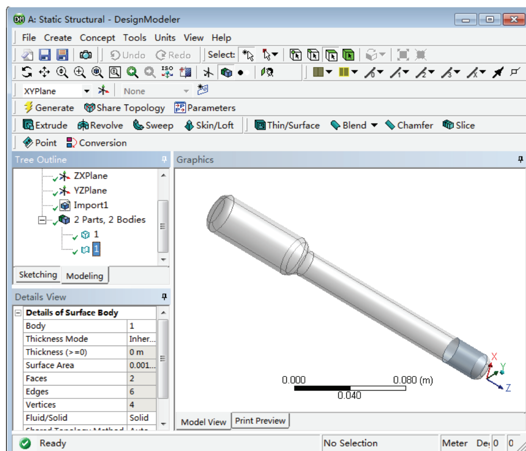


图 5-8　生成前的 DesignModeler 界面　　　　图 5-9　生成后的 DesignModeler 界面

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5.2.4 添加材料库

Step1： 双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入图 5-10 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

Step2： 在界面的空白处单击鼠标右键，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），此时的界面会变为图 5-11 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

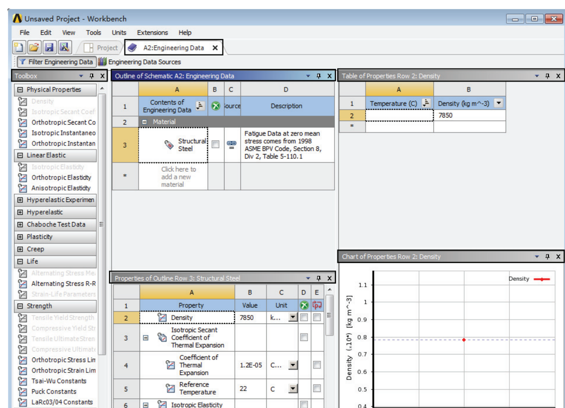


图 5-10 材料参数设置界面 1

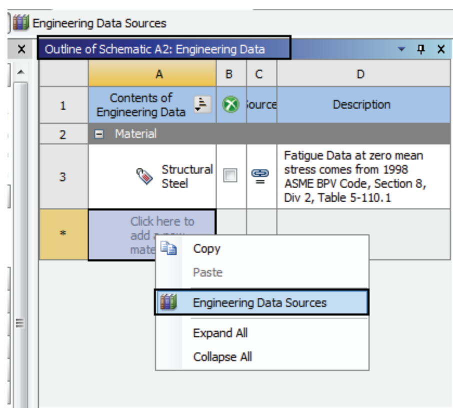


图 5-11 材料参数设置界面 2

Step3： 在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of Favorites 表中 A5 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加），此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 5-12 所示，标识材料添加成功。

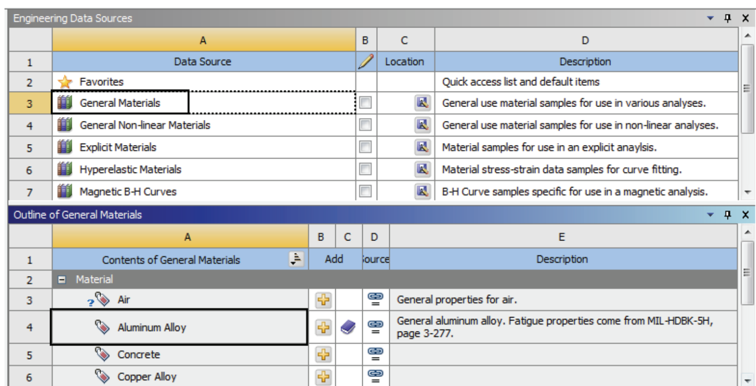


图 5-12 添加材料

Step4： 同 Step2，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

Step5： 根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 4:Aluminum Alloy 表中可以修改材料的特性，如图 5-13 所示，本实例采用的是默认值。

Outline of General Materials

	A	B	C	E
1	Contents of General Materials	Add		Description
2	Material			
3	Air			General properties for air.
4	Aluminum Alloy			General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Properties of Outline Row 4: Aluminum Alloy

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2770	kg m^-3
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...	
8	Young's Modulus	7.1E+10	Pa
9	Poisson's Ratio	0.33	
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa
12	Alternating Stress R-Ratio	Tabular	
16	Tensile Yield Strength	2.8E+08	Pa
17	Compressive Yield Strength	2.8E+08	Pa
18	Tensile Ultimate Strength	3.1E+08	Pa
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

图 5-13　材料属性窗口

提示：用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5.2.5 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 选项，进入图 5-14 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

提示：ANSYS Workbench 16.0 程序默认的材料为 Structural Steel。

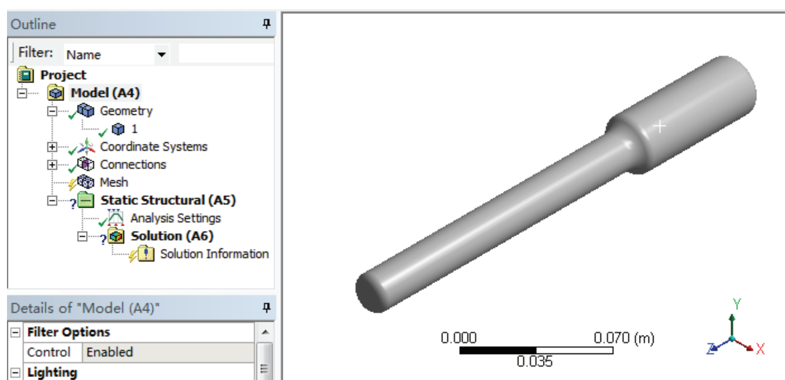


图 5-14　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical→Outlines（分析树）→Geometry→Bar，此时即可在 Details of “1”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-15 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminum Alloy，选择即可将其添加到模型中去。如图 5-16 所示，表示材料已经添加成功。

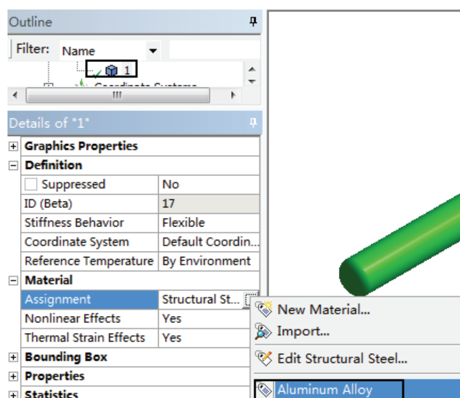


图 5-15 添加材料

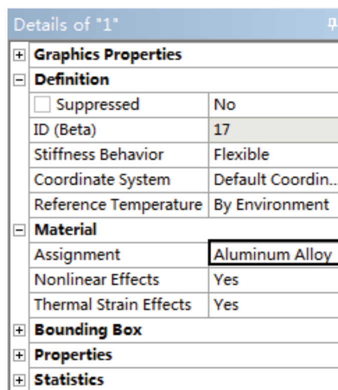


图 5-16 修改材料后的分析树

5.2.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical→Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例中在 Sizing 中的 Element Size 中设置为 0.005，其余采用默认设置，如图 5-17 所示。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5-18 所示。

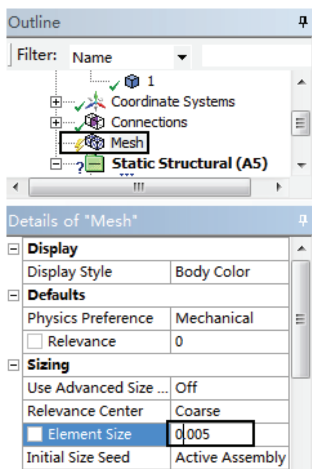


图 5-17 生成网格

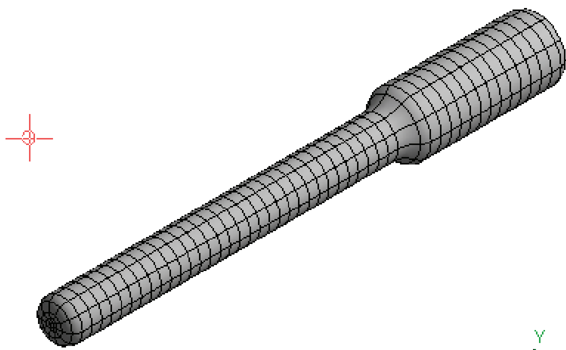


图 5-18 网格效果

5.2.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A5）选项，此时会出现图 5-19 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 5-20 所示。

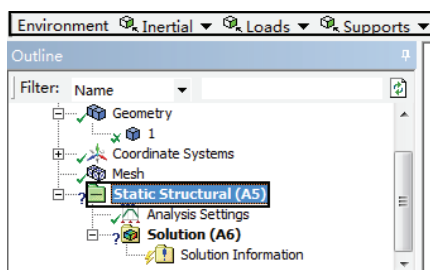


图 5-19　Environment 工具栏

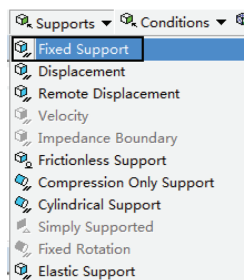


图 5-20　添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of“Static Structural（A5）”（参数列表）→Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 5-21 所示。

Step4：如同 Step2，选择 Environment→Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 5-22 所示。

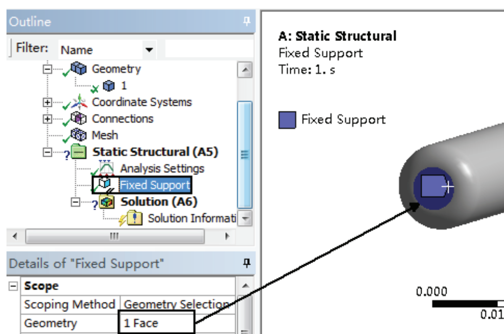


图 5-21　施加固定约束

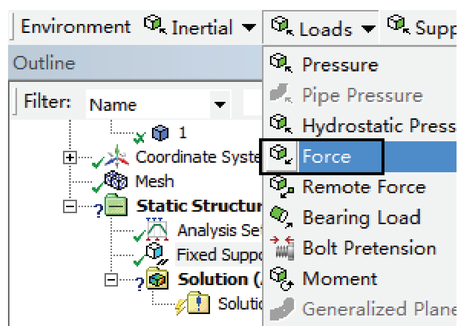


图 5-22　添加力

Step5：选中 Force，在 Details of “Force”（参数列表）面板中进行如下设置及输入：

在 Geometry 选项下确保图 5-23 所示的面被选中并单击 Apply 按钮，此时在 Geometry 栏中显示 1Face，表明一个面已经被选中。

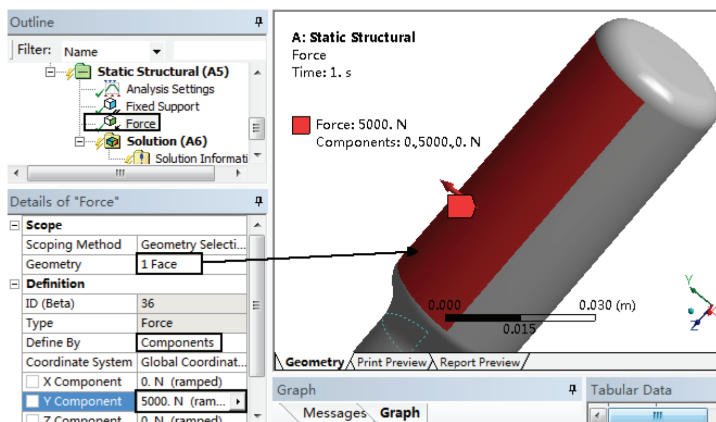


图 5-23　添加面载荷

在 Define By 栏中选择 Components 选项。

在 Y Components 栏中输入-5000N。

在 Direction 选项中单击 Apply 按钮，此时在绘图窗口中弹出⇆图标，可以切换方向，单击向右的箭头一次，此时施加在几何上的箭头改变方向，保持其他选项默认即可。

Step6：确定后的载荷方向及大小，如图 5-24 所示。

Step7：在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 5-25 所示。

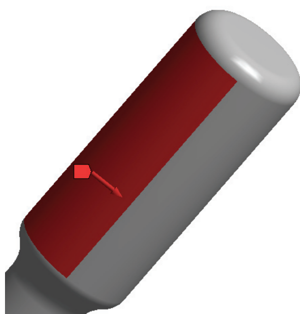


图 5-24　载荷方向

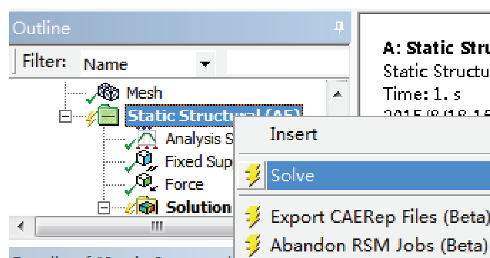


图 5-25　求解

5.2.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 5-26 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 5-27 所示。

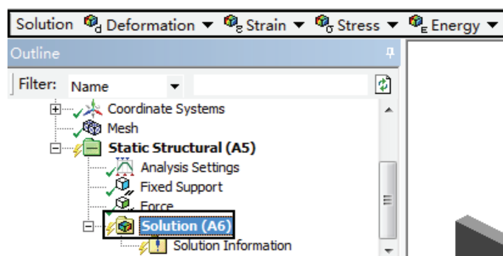


图 5-26　Solution 工具栏

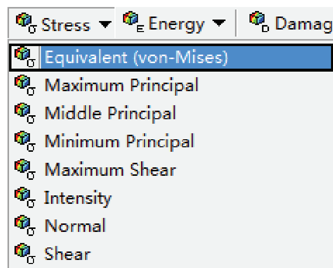


图 5-27　添加等效应力选项

Step3：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 5-28 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

Step4：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 5-29 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。



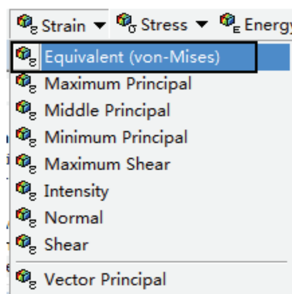


图 5-28　添加等效应变选项

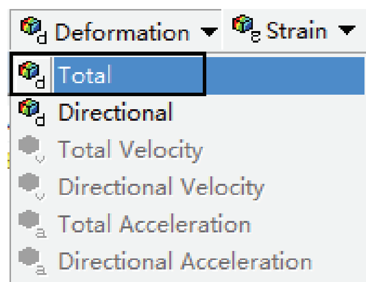


图 5-29　添加总变形选项

Step5： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 5-30 所示。

Step6： 选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Stress 选项，此时会出现图 5-31 所示的应力分析云图。

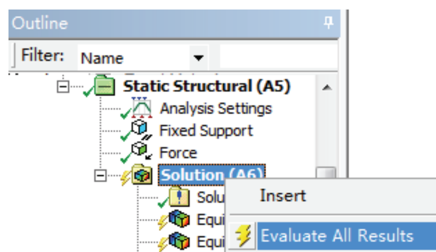


图 5-30　快捷菜单

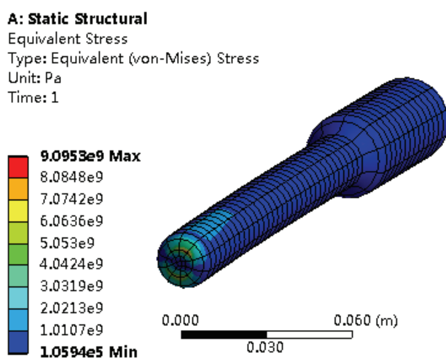


图 5-31　应力分析云图

Step7： 选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Elastic Strain 选项，此时会出现图 5-32 所示的应变分析云图。

Step8： 选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），此时会出现图 5-33 所示的总变形分析云图。

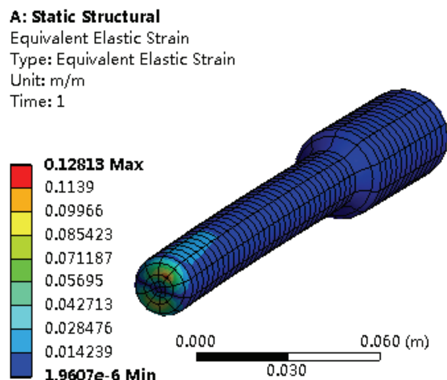


图 5-32　应变分析云图

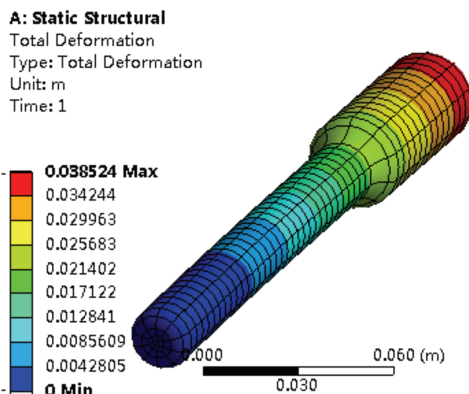


图 5-33　总变形分析云图

从以上分析可以看出，作用在铝合金模型中的恒定外载荷（压力）使得中间圆柱位置的应力比较大，这符合截面积小应力大的理论，在做受力结构件的设计时应该避免出现这种结构，从而增加设计强度。

5.2.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save （保存）按钮，在文件名中输入 SolidStaticStructure 保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

5.3 静力分析实例 2——子模型静力分析

这节将通过一个简单的实例介绍一下 ANSYS Workbench 16.0 的特有分析方法，即子模型分析。

子模型分析是 ANSYS Workbench 16.0 新加的一个模块，子模型分析比较广泛地应用于模型的细化分析，以提高局部的分析精度，请读者掌握子模型分析的基本过程。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 子模型分析方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter05\char05-2\Sub_Model.sat；Model.sat
结果文件	网盘\Chapter05\char05-2\Sub_Model.wbpj

5.3.1 问题描述

在工程分析中常常会遇到一些结构比较复杂的模型，而在这类模型的某些位置，特别是在一些过渡连接的位置或者特征比较复杂的位置需要细化网格，以满足精度计算的要求，但是由于硬件的资源显示，这些问题尽管原理很简单，但是却很棘手，旧版本的 ANSYS Workbench 只能通过 APDL 编程来辅助分析，对于初学者或者一般工程人员来说，上手比较困难，从 ANSYS Workbench 16.0 版本开始，可以不需要特殊编程即可完成细化分析——子模型分析。

下面将通过一个简单的例子讲解一下如何对图 5-34 所示的模型进行子模型分析。

5.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-35 所示。

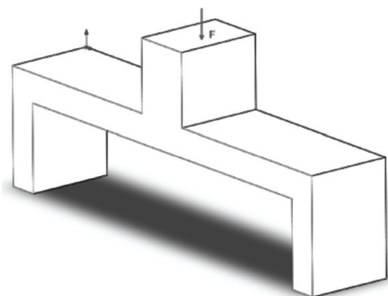


图 5-34 铝合金模型

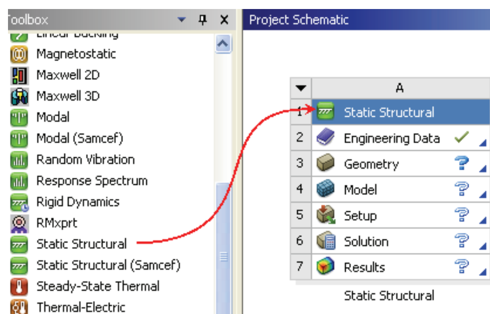


图 5-35 创建分析项目 A

5.3.3 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 5-36 所示，此时会弹出“打开”对话框。

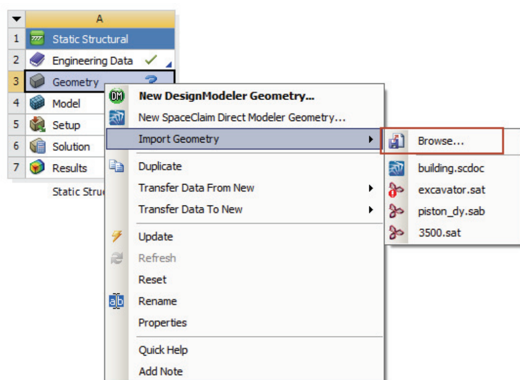


图 5-36 导入几何体

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 model.sat 几何体文件，如图 5-37 所示，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

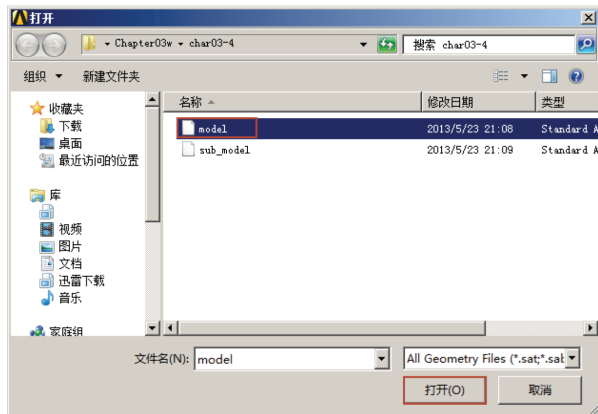


图 5-37 “打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，选择单位为 m，单击 OK 按钮，此时设计树中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 5-38 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 5-39 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无须进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

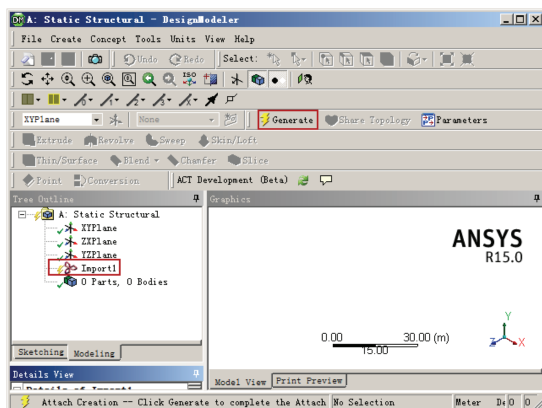


图 5-38　生成前的 DesignModeler 界面

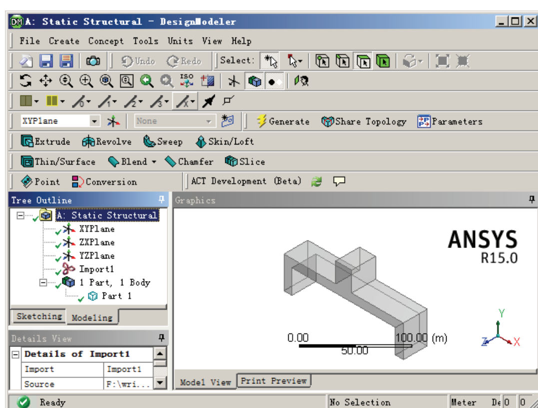


图 5-39　生成后的 DesignModeler 界面

5.3.4　添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入图 5-40 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

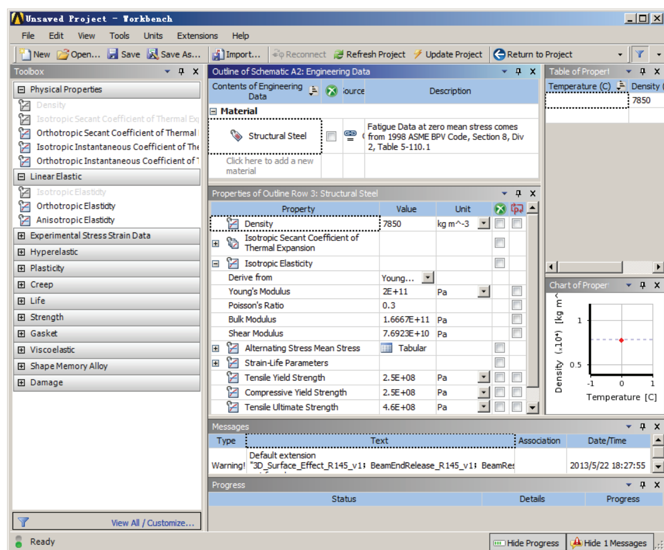


图 5-40　材料参数设置界面 1

Step2：在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）选项，此时的界面会变为图 5-41 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

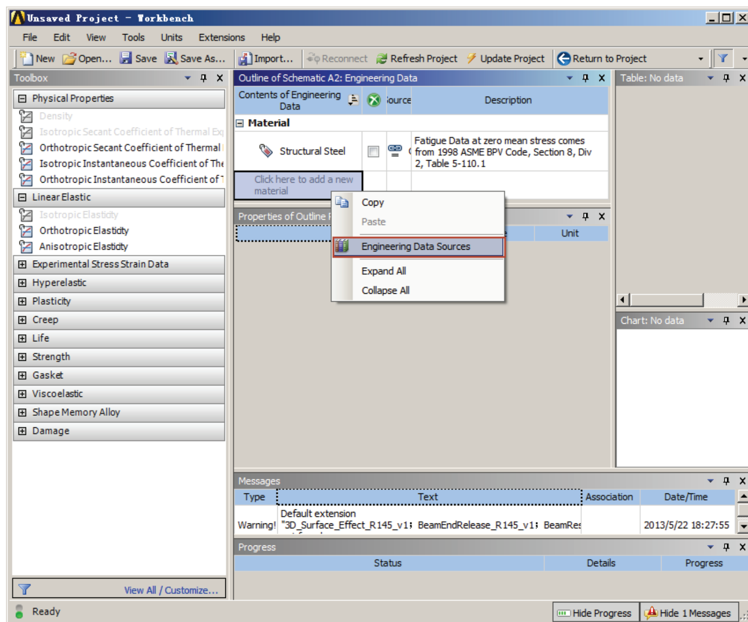


图 5-41　材料参数设置界面 2

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of Favorites 表中 A5 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B5 栏的 （添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示 （使用中的）标识，如图 5-42 所示，标识材料添加成功。

Step4：同 Step2，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

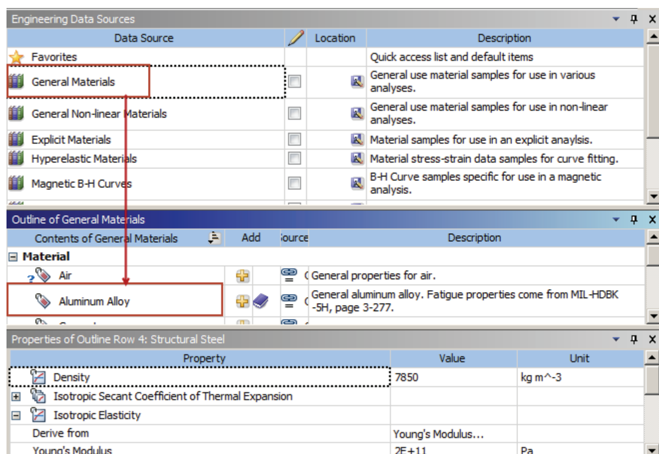


图 5-42　添加材料

Step5： 根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 5:Aluminum Alloy 表中可以修改材料的特性，如图 5-43 所示，本实例采用的是默认值。

提示： 用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

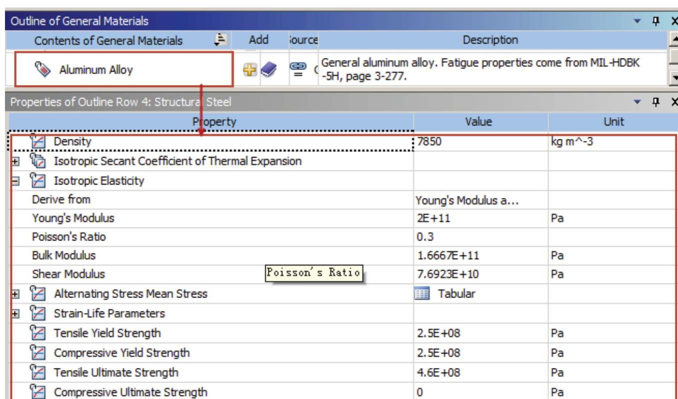


图 5-43　材料属性窗口

Step6： 单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5.3.5 添加模型材料属性

Step1： 双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 5-44 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置和结果观察等操作。

提示： ANSYS Workbench 16.0 程序默认的材料为 Structural Steel。

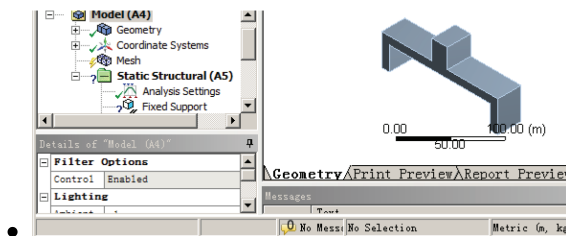


图 5-44　Mechanical 界面

Step2： 选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→Part1，此时即可在 Details of “Part1”（参数列表）中给模型添加材料，如图 5-45 所示。

Step3： 单击参数列表中的 Material→Assignment 黄色区域后的 ▸ 按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminum Alloy，选择即可将其添加到模型中去。如图 5-46 所示，表示材料已经添加成功。



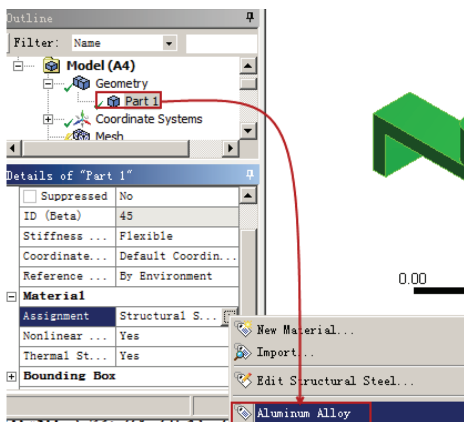


图 5-45　添加材料

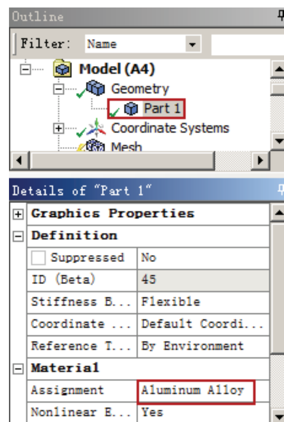


图 5-46　修改材料后的分析树

5.3.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，本例中将 Sizing 中的 Element Size 设置为 10m，其余采用默认设置如图 5-47 所示。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 5-48 所示。

注意：本实例为了演示子模型的使用方法，所以全模型的网格划分比较粗糙。

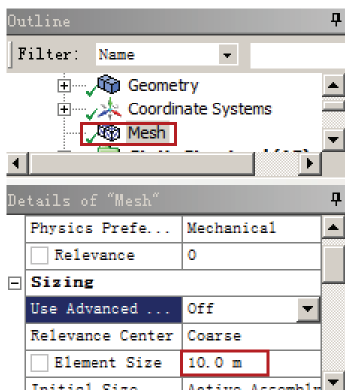


图 5-47　生成网格

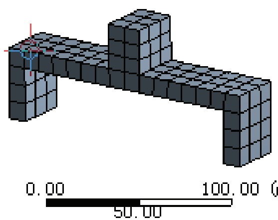


图 5-48　网格效果

5.3.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A5）选项，此时会出现图 5-49 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 5-50 所示。

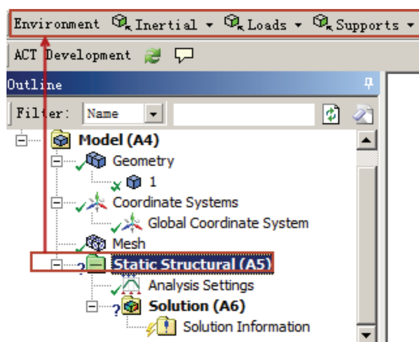


图 5-49 Environment 工具栏

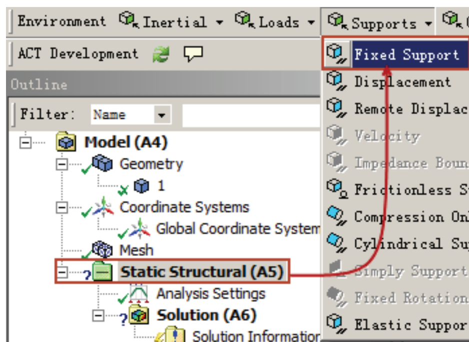


图 5-50 添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Static Structural（A5）”（参数列表）→Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 5-51 所示。

Step4：如同 Step2，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 5-52 所示。

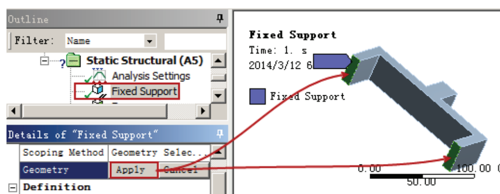


图 5-51 施加固定约束

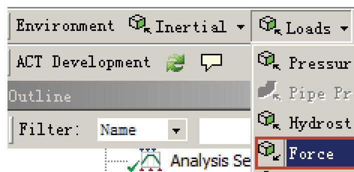


图 5-52 添加力

Step5：选中 Force，在“Details of ‘Force’”（参数列表）面板中进行如下设置及输入。

在 Geometry 选项下确保图 5-53 所示的两个面被选中并单击 Apply 按钮，此时在 Geometry 栏中显示 2Face，表明一个面已经被选中。

在 Define By 栏中选择 Components 选项。

在 X Component 选项中输入-2000N，其余默认即可。

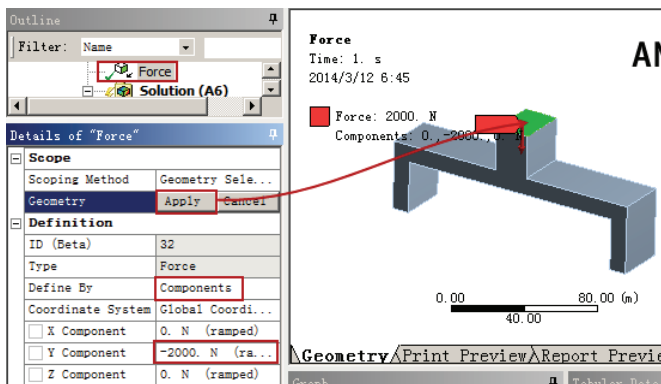


图 5-53 添加面载荷

Step6： 在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

5.3.8 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 5-54 所示的 Solution 工具栏。

Step2： 选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 5-55 所示。

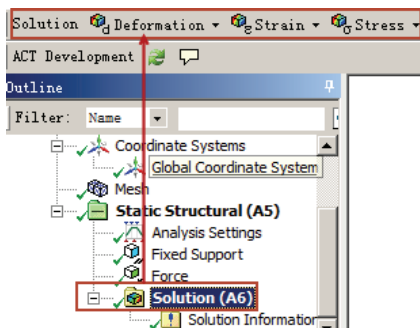


图 5-54 Solution 工具栏

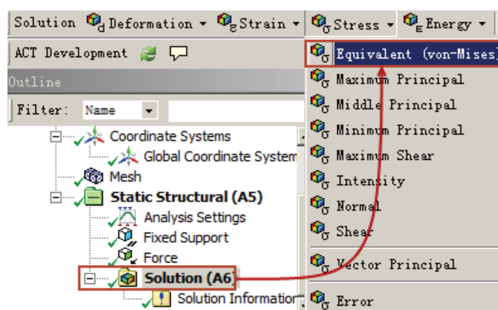


图 5-55 添加等效应力选项

Step3： 如同 Steep2，选择 Solution 工具栏中的 Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 5-56 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

Step4： 如同 Steep2，选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 5-57 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

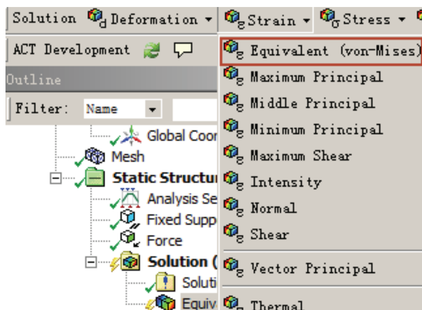


图 5-56 添加等效应变选项

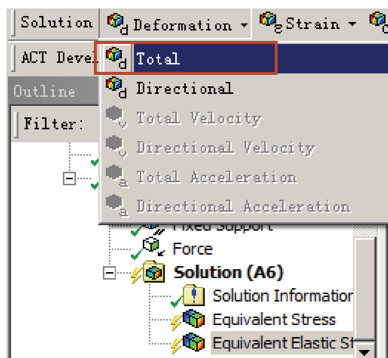


图 5-57 添加总变形选项

Step5： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 5-58 所示。

Step6： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Equivalent Stress 选项，此时会出现图 5-59 所示的应力分析云图。

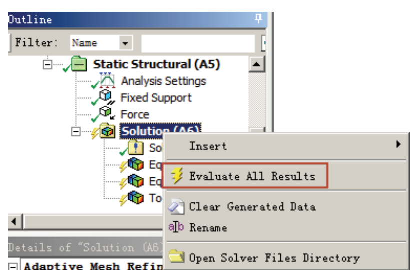


图 5-58 快捷菜单

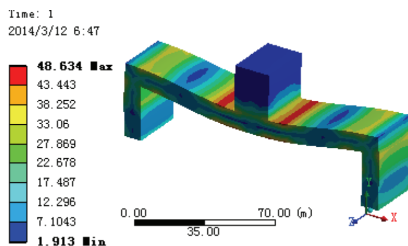


图 5-59 应力分析云图

Step7： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Equivalent Elastic Strain 选项，此时会出现图 5-60 所示的应变分析云图。

Step8： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Total Deformation（总变形），此时会出现图 5-61 所示的总变形分析云图。

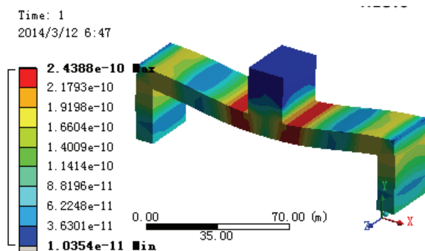


图 5-60 应变分析云图

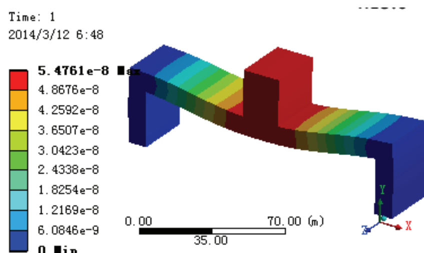


图 5-61 总变形分析云图

Step9： 单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

5.3.9 子模型分析

Step1： 右键单击项目 A 中的 A1，在弹出的快捷菜单中选择 Duplicate（复制工程）选项，如图 5-62 所示，复制一个分析项目到项目 B。

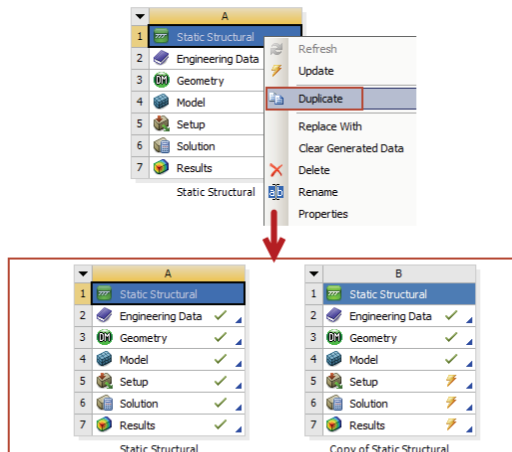


图 5-62 复制项目

Step2：右键单击项目 B 中的 B3，在弹出的快捷菜单中选择 Replace Geometry→Browse 选项，如图 5-63 所示。

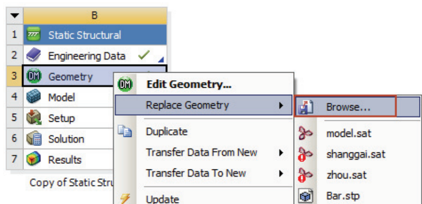


图 5-63　快捷菜单

Step3：在弹出的“打开”对话框中选择几何文件为 Sub_Model.sat 的文件，如图 5-64 所示。

Step4：单击项目 A 中的 A6 不放直接拖到项目 B 中的 B5，如图 5-65 所示。

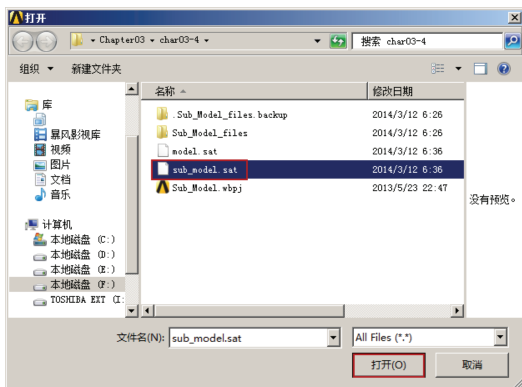


图 5-64　选择几何文件

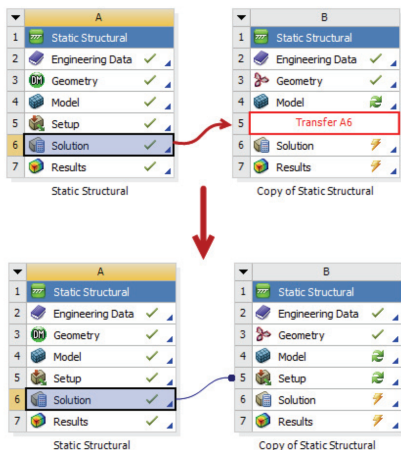
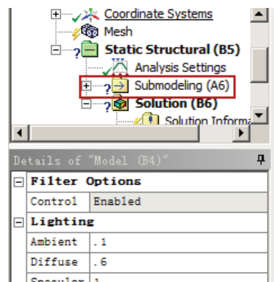


图 5-65　数据传递

Step5：右键单击 B5，在弹出的快捷菜单中选择 Refresh 命令，更新数据。

Step6：双击 B4 进入到 Mechanical 平台，此时在 Mechanical 平台中出现图 5-66 所示命令，此命令表示可以添加子模型激励。



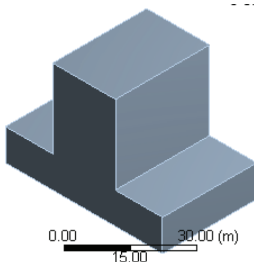


图 5-66　子模型激励

Step7：将材料设置为 Aluminum Alloy。

Step8： 删除 Static Structural (B5)→Fixed Support 和 Force 两个选项。

Step9： 划分网格，将网格大小设置为 1.0m，如图 5-67 所示。

Step10： 划分完成后的网格模型如图 5-68 所示。

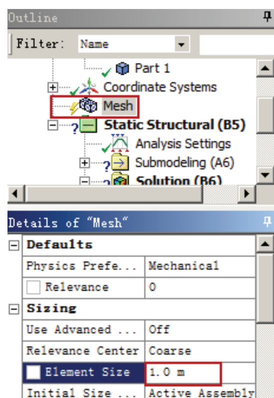


图 5-67 网格设置

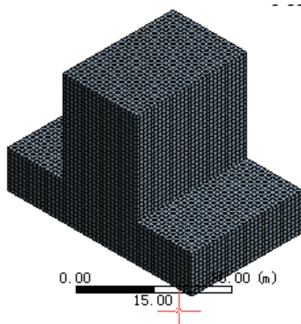


图 5-68 网格模型

Step11： 右键单击 Submodeling (Solution)，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Cut Boundary Constraint 选项，如图 5-69 所示。

注：ANSYS 16.0 的子模型命令与之前的版本不同，请读者注意！

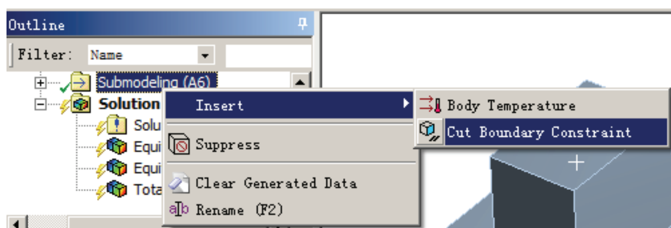


图 5-69 快捷菜单

Step12： 在弹出的图 5-70 所示的 Imported Cut Boundary Constraint 详细设置窗口中的 Geometry 栏中选择 3 个圆柱面。

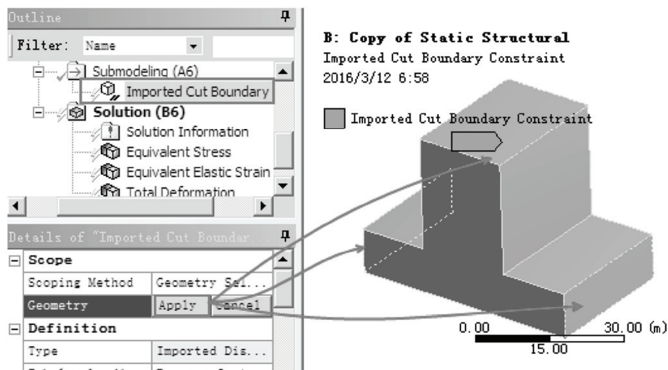


图 5-70 快捷菜单



Step13：右键单击 Imported Cut Boundary Constraint 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Imported Load 选项。

Step14：导入完成后的载荷添加及信息如图 5-71 所示。

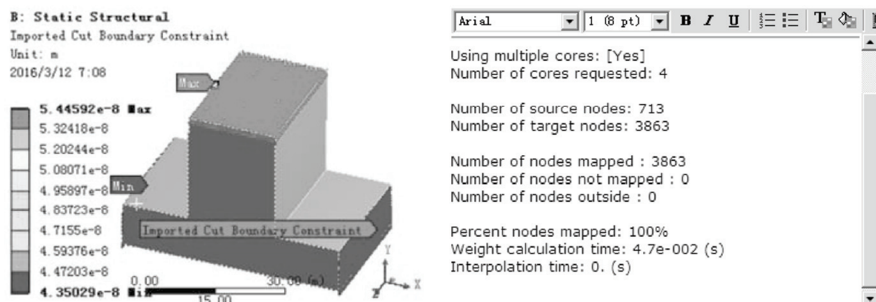


图 5-71　载荷及信息

Step15：在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

Step16：图 5-72～图 5-74 所示为应力、应变及位移云图。

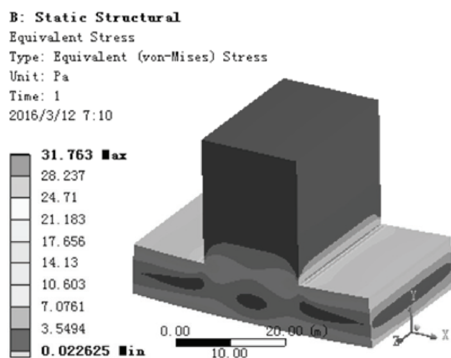


图 5-72　应力分布云图

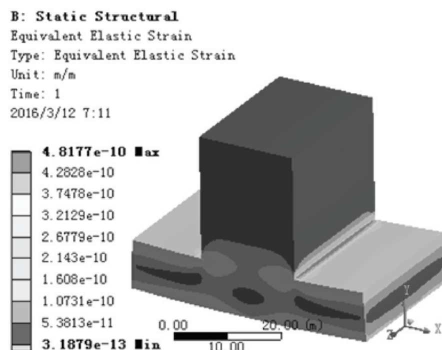


图 5-73　应变分布云图

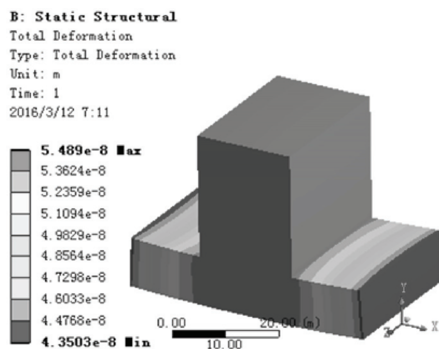


图 5-74　位移分布云图

5.3.10 保存并退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的✕（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的✕（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

读者根据子模型分析的方法和步骤，详细揣摩子模型分析的机理，子模型分析比较适合几何模型比较复杂的结构，如汽车的轮毂结构一般比较复杂，而且属于周期对称结构，一般分析汽车轮毂时可以取出其中一部分做有限元分析，但是考虑到结构在轮缘与辐射毂之间过渡的位置受力容易出现奇异值，所以在过渡位置进行细化分析，提高计算精度以保证工程需要。

5.4 本章小结

线性材料结构静力学分析是有限元分析中最常见的分析类型。在工业品、制造业、消费品、土木工程、医学研究、电力传输和电子设计等领域中经常用到此类分析。

本章通过典型案例分别介绍了梁单元、实体单元的有限元静力分析的一般过程，包括材料导入与建模、材料选择与材料属性赋予、有限元网格的划分、对模型施加边界条件、外载荷、结构后处理及大变形的开启等。

通过本章节的学习，读者应对 ANSYS Workbench 子模型的分析方法有了一个深入的了解，同时借助 ANSYS 帮助文档深入学习，熟练掌握其操作步骤与分析方法。

第 6 章 模 态 分 析

ANSYS Workbench 16.0 软件为用户提供了多种动力学分析工具，可以完成各种动力学现象的分析和模拟，其中包括模态分析、响应谱分析、随机振动分析、谐响应分析、线性屈曲分析、瞬态动力学分析及显式动力学分析，其中显式动力学分析由 ANSYS AUTODYN 及 ANSYS LS-DYNA 两个求解器完成。

本章将对 ANSYS Workbench 软件的模态分析模块进行讲解，并通过典型应用对各种分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
模态分析应用	√			
模态分析的意义		√	√	√
ANSYS Workbench 模态分析		√	√	√
ANSYS Workbench 模态分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 模态后处理			√	√

6.1 结构动力学分析简介

动力学分析是用来确定惯性和阻尼起重要作用时结构的动力学行为的技术，典型的动力学行为有结构的振动特性，如结构的振动和自振频率、载荷随时间变化的效应或交变载荷激励效应等。动力学分析可以模拟的物理现象包括振动冲击、交变载荷、地震载荷、随机载荷等。

6.1.1 结构动力学分析

动力学问题遵循的平衡方程为

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}'' + \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}' + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F}(t) \tag{6-1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 是质量矩阵；$\boldsymbol{C}$ 是阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 是刚度矩阵；$\boldsymbol{x}$ 是位移矢量；$\boldsymbol{F}(t)$ 是力矢量；$\boldsymbol{x}'$ 是速度矢量；$\boldsymbol{x}''$ 是加速度矢量。

动力学分析适用于快速加载、冲击碰撞的情况，在这种情况下惯性力和阻尼的影响不能被忽略。如果结构静定，载荷速度较慢，则动力学计算结果将等同于静力学计算结果。

由于动力学问题需要考虑结构的惯性，因此对于动力学分析来说，材料参数必须定义密度，另外材料的弹性模量和泊松比也是必不可少的输入参数。

6.1.2 结构动力学分析的阻尼

结构动力学分析的阻尼是振动能量耗散的机制，可以使振动最终停下来，阻尼大小取决于材料、运动速度和振动频率。阻尼参数在式（6-1）中由阻尼矩阵 ***C*** 描述，阻尼力与运动速度成比例。

动力学中常用的阻尼形式有阻尼比、α 阻尼和 β 阻尼，其中 α 阻尼和 β 阻尼统称为瑞利阻尼（Rayleigh 阻尼），下面将简单介绍一下以上 3 种阻尼的基本概念及公式。

1）阻尼比 ξ：指阻尼系数与临界阻尼系数之比。临界阻尼定义为出现振荡与非振荡行为之间的临界点的阻尼值，此时阻尼比 ξ=1.0，对于单自由度系统弹簧质量系统，质量 m，圆频率 ω，则临界阻尼 C=2mω。

2）瑞利阻尼（Rayleigh 阻尼）：包括 α 阻尼和 β 阻尼。如果质量矩阵为 ***M***，刚度矩阵为 ***K***，则瑞丽阻尼矩阵为 ***C***=α***M***+β***K***，所以 α 阻尼和 β 阻尼分别被称为质量阻尼和刚度阻尼。

阻尼比与瑞利阻尼之间的关系为：ξ=α/2ω+βω/2，从此公式可以看出，质量阻尼过滤低频部分（频率越低，阻尼越大），而刚度阻尼则过滤高频部分（频率越高，阻尼越大）。

3）定义 α 阻尼和 β 阻尼：运用关系式 ξ=α/2ω+βω/2，指定两个频率 ω_i 和 ω_j 对应的阻尼比 ξ_i 和 ξ_j，则可以计算出 α 阻尼和 β 阻尼，如下所示

$$\alpha=\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2-\omega_i^2}(\omega_j\zeta_i-\omega_i\zeta_j)$$
$$\beta=\frac{2}{\omega_j^2-\omega_i^2}(\omega_j\zeta_j-\omega_i\zeta_i) \quad （6-2）$$

4）阻尼值量级：以 α 阻尼为例，α=0.5 为很小的阻尼，α=2.5 为显著的阻尼，α=5~10 为非常显著的阻尼，α>10 为很大的阻尼，不同阻尼情况下结构的变形可能会有较明显的差异。

6.2 模态分析简介

模态分析是计算结构振动特性的数值技术，结构振动特性包括固有频率和振型。模态分析是最基本的动力学分析，也是其他动力学分析的基础，如响应谱分析、随机振动分析、谐响应分析等都需要在模态分析的基础上进行。

模态分析可以帮助设计人员确定结构的固有频率和振型，从而使结构设计避免共振，并指导工程师预测在不同载荷作用下结构的振动形式。

此外，模态分析还有助于估算其他动力学分析参数，比如瞬态动力学分析中为了保证动力响应的计算精度，通常要求在结构的一个自振周期有不少于 25 个计算点，模态分析可以确定结构的自振周期，从而帮助分析人员确定合理的瞬态分析时间步长。

6.2.1 模态分析

模态分析的好处在于：可以使结构设计避免共振或者以特定的频率进行振动；工程师从中可以认识到结构对不同类型的动力载荷是如何响应的；有助于在其他动力分析中估算求解控制参数。

ANSYS Workbench 16.0 模态求解器有图 6-1 所示的几种类型，其中默认为程序自动控制类型（Program Control）。

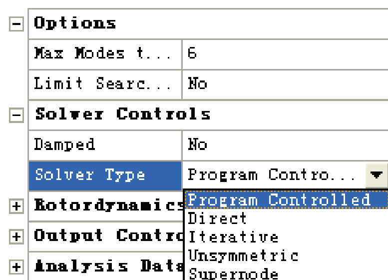


图 6-1　求解器控制类型

除了常规的模态分析外，ANSYS Workbench 16.0 还可计算含有接触的模态分析及考虑有预应力的模态分析。

图 6-2 所示为在工具箱中存在的两种进行模态计算的求解器，其中项目 A 为利用 Samcef 求解器进行的模态分析，项目 B 为采用 ANSYS 默认求解器进行的模态分析。

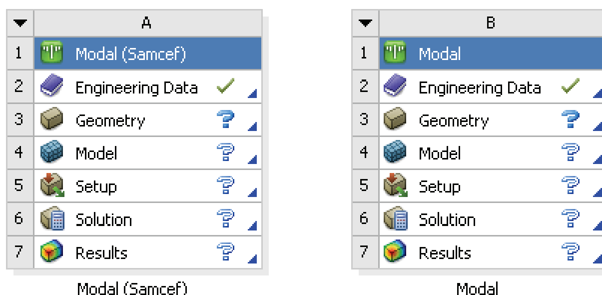


图 6-2　模态分析项目

6.2.2 模态分析基础

无阻尼模态分析是经典的特征值问题，动力学问题的运动方程如下所示

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}''+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=0 \tag{6-3}$$

结构的自由振动为简谐振动，即位移为正弦函数　$x = x\sin(\omega t)$　（6-4）

代入式（6-3）得：　$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{x}=0$　（6-5）

式（6-4）为经典的特征值问题，此方程的特征值为 ω_i^2，其开方 ω_i 就是自振圆频率，自振频率为 $f=\dfrac{\omega_i}{2\pi}$。

特征值 ω_i 对应的特征向量 $\{x\}_i$ 为自振频率 $f=\dfrac{\omega_i}{2\pi}$ 对应的振型。

说明：模态分析实际上就是进行特征值和特征向量的求解，也成为模态提取。模态分析中材料的弹性模量、泊松比及材料密度是必须定义的。

6.2.3 预应力模态分析

结构中的应力可能会导致结构刚度的变化，这方面的典型例子是琴弦，大家都有这样的经验，张紧的琴弦比松弛的琴弦声音要尖锐，这是因为张紧的琴弦刚度更大，从而导致自振频率更高的缘故。

叶轮叶片在转速很高的情况下，由于离心力产生的预应力的作用，其自然频率有增大的趋势，如果转速高到这种变化已经不能被忽略的程度，则需要考虑预应力对刚度的影响。

预应力模态分析就是用于分析含预应力结构的自振频率和振型，预应力模态分析和常规模态分析类似，但可以考虑载荷产生的应力对结构刚度的影响。

6.3 模态分析实例 1——模态分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的模态分析模块，计算圆板的自振频率特性。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 模态分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter06\char06-1\Modal.wbpj

6.3.1 问题描述

如图 6-3 所示圆板模型，请用 ANSYS Workbench 分析圆板自振频率变形。

6.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 6-4 所示。

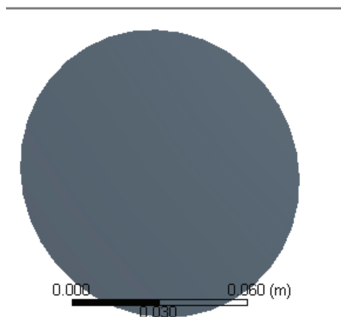


图 6-3 圆板模型

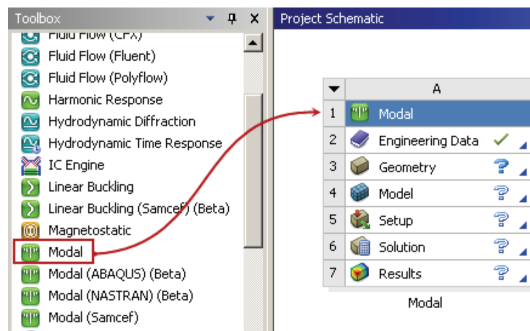


图 6-4 创建分析项目 A

6.3.3 创建几何体

Step1： 双击 A3 Geometry 栏进入到 DesignModeler 几何建模平台，单击 Sketching 面板，在 XYPlane 平面上绘制图 6-5 所示的圆形，并对圆形进行标注：D3=100mm。

Step2： 依次选择菜单 Concept→Surface from Sketch 选项，如图 6-6 所示，在厚度栏中输入 1mm，单击工具栏中的 Generate 按钮生成几何模型。

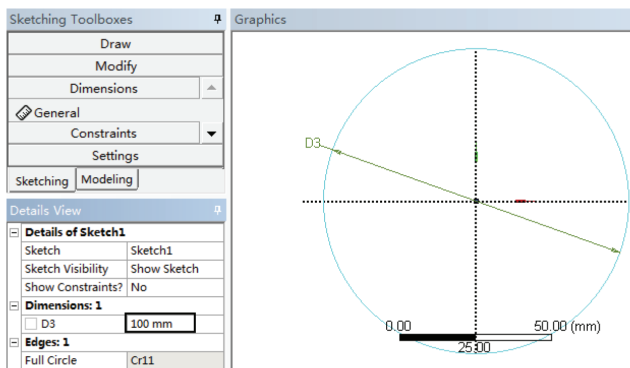


图 6-5 草绘图形

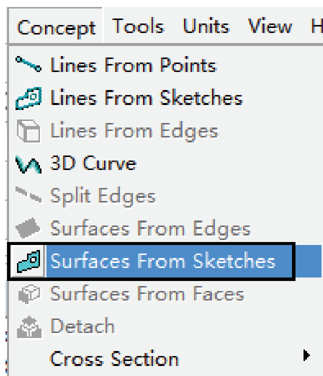


图 6-6 菜单命令

Step3： 单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6.3.4 添加材料库

Step1： 双击项目 A 中的 A2Engineering Data 项，进入图 6-7 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

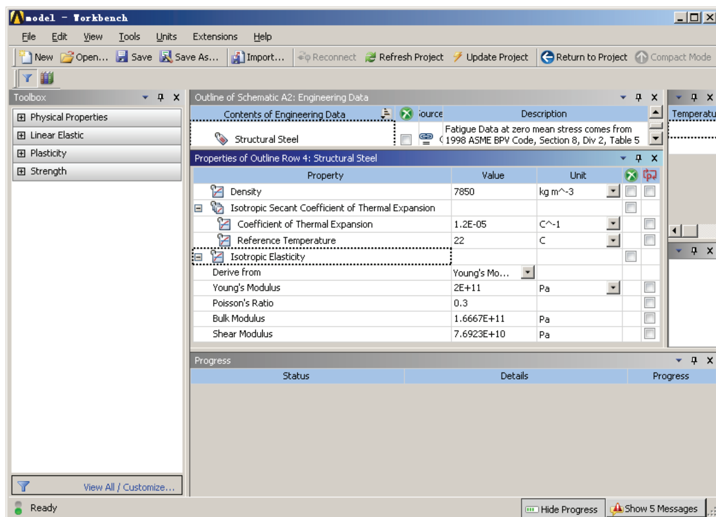


图 6-7 材料参数设置界面 1

Step2： 在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）选项，此时的界面会变为图 6-8 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

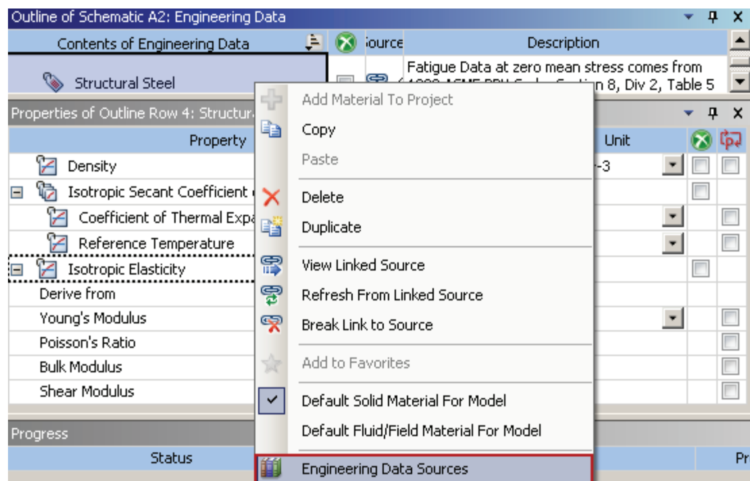


图 6-8 材料参数设置界面 2

Step3： 在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of Favorites 表中 A11 栏 Stainless Steel（不锈钢）后的 B11 栏的（添加）按钮，此时在 C11 栏中会显示（使用中的）标识，如图 6-9 所示，标识材料添加成功。

Step4： 同 Step2，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

Step5： 根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3:Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 6-10 所示，本实例采用的是默认值。

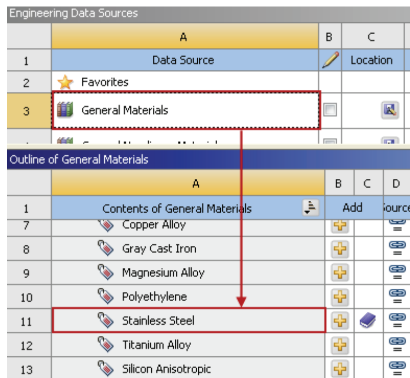


图 6-9 添加材料

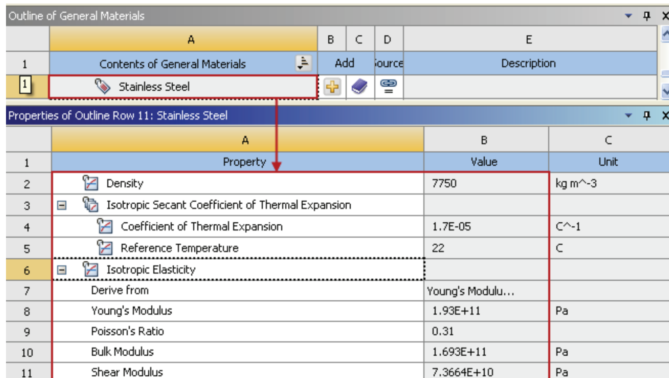


图 6-10 材料参数修改窗口

提示： 用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6.3.5 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 6-11 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

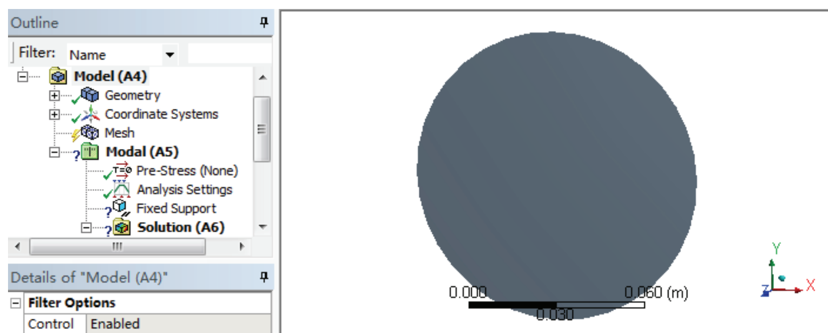


图 6-11　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→Surface Body 选项，此时即可在 Details of “Surface Body”（参数列表）中给模型添加材料，如图 6-12 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ▸ 按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，选择即可将其添加到模型中去。此时分析树 Geometry 前的 ? 变为 ✓，如图 6-13 所示，表示材料已经添加成功。

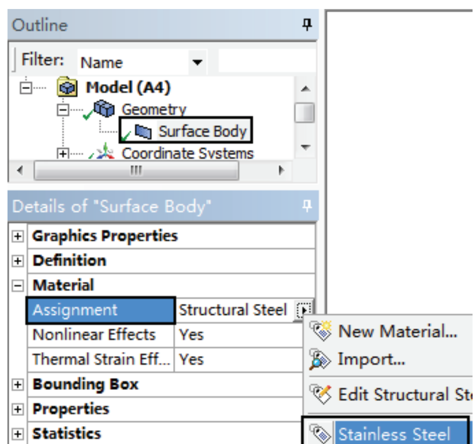


图 6-12　添加材料

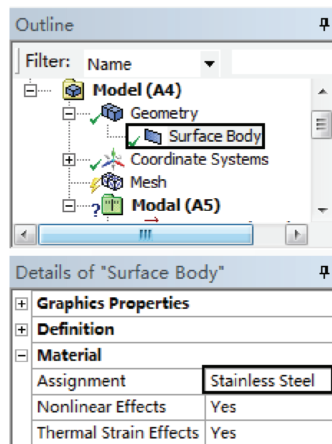


图 6-13　添加材料后的分析树

6.3.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 6-14 所示在 Relevance 栏中移动滑块到 100，将

Element Size 设置为 5.e-003m，其余采用默认设置。

Step2： 在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分完成的网格效果如图 6-15 所示。

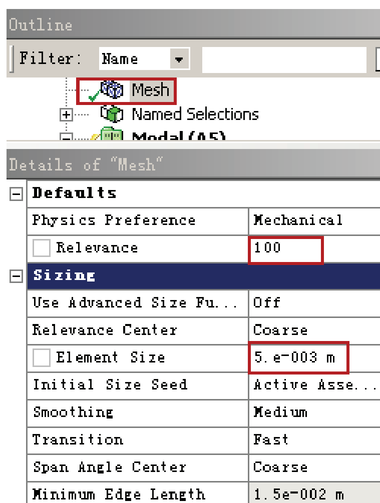


图 6-14　生成网格

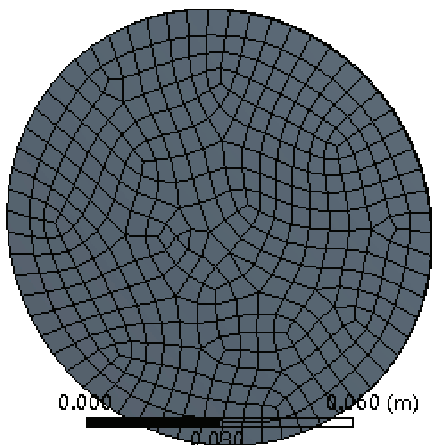


图 6-15　网格效果

6.3.7 施加载荷与约束

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Modal（A5）选项，此时会出现图 6-16 所示的 Environment 工具栏。

Step2： 选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 6-17 所示。

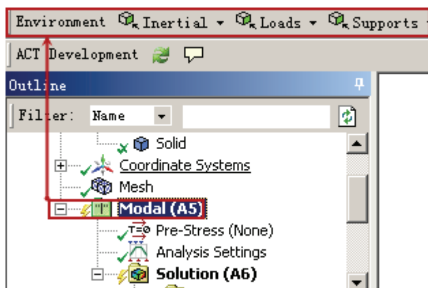


图 6-16　Environment 工具栏

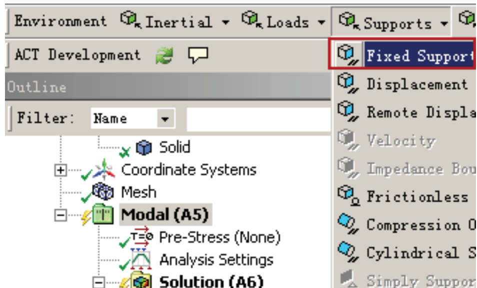


图 6-17　添加固定约束

Step3： 选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Fixed Support”→Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 6-18 所示。

Step4： 在 Outlines（分析树）中的 Modal（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 6-19 所示。



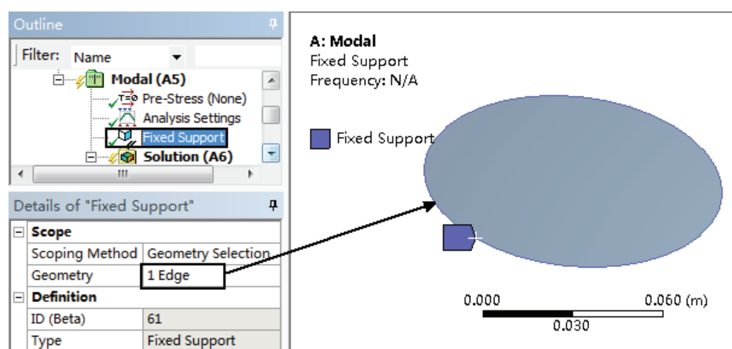


图 6-18 施加固定约束

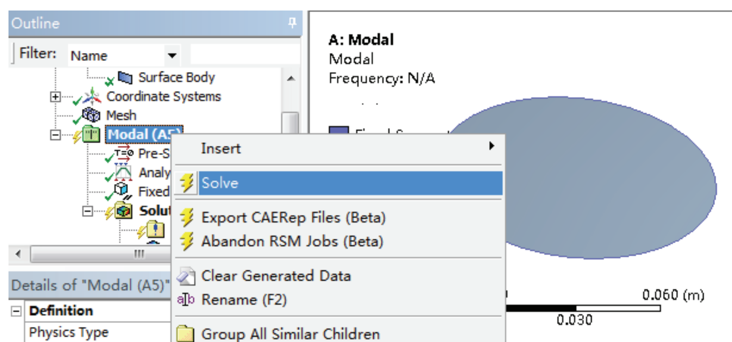


图 6-19 求解

6.3.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 6-20 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-21 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

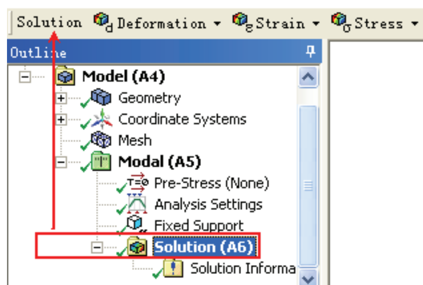


图 6-20 Solution 工具栏

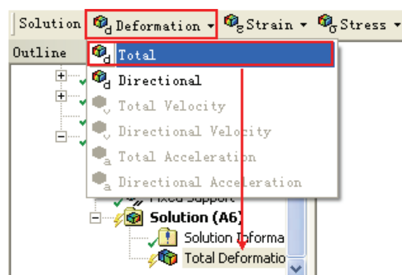


图 6-21 添加变形选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 6-22 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4： 选择 Outline（分析树）→Solution（A6）→Total Deformation（总变形）选项，此时会出现图 6-23 所示的一阶模态总变形分析云图。

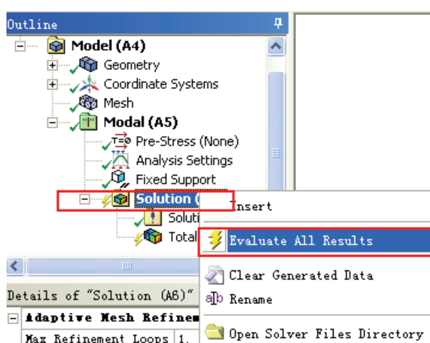


图 6-22 快捷菜单

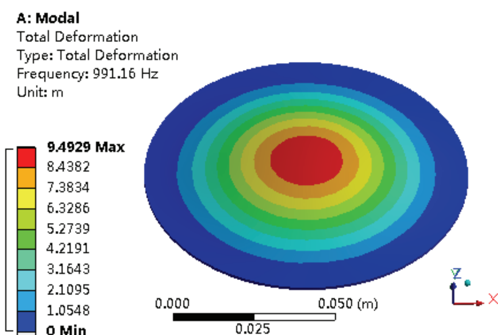


图 6-23 一阶模态总变形云图

Step5： 图 6-24 所示为方杆二阶变形云图。

Step6： 图 6-25 所示为方杆三阶变形云图。

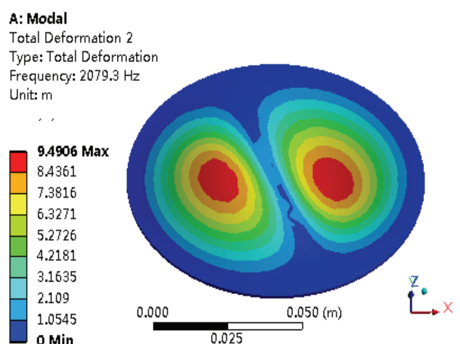


图 6-24 二阶变形云图

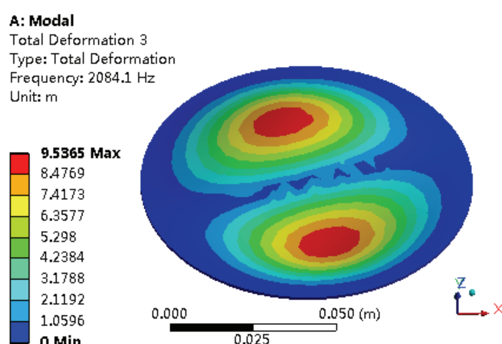


图 6-25 三阶变形云图

Step7： 图 6-26 所示为方杆四阶变形云图。

Step8： 图 6-27 所示为方杆五阶变形云图。

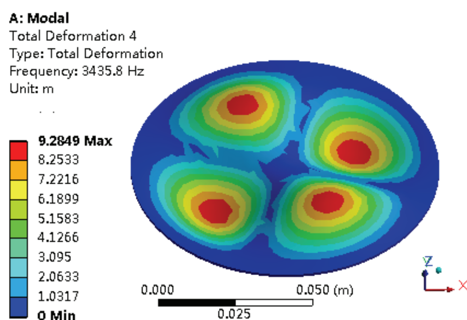


图 6-26 四阶变形云图

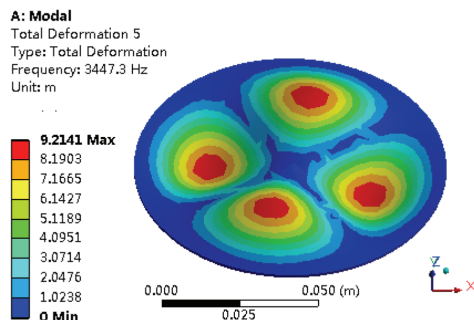


图 6-27 五阶变形云图



Step9：图 6-28 所示为方杆六阶变形云图。

Step10：图 6-29 所示为方杆前 6 阶模态频率，Workbench 模态计算时的默认模态数量为 6。

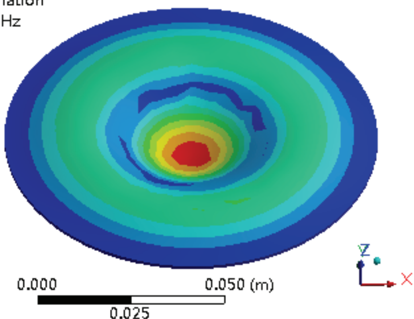


图 6-28　六阶变形云图

Tabular Data

	Mode	Frequency [H
1	1.	991.16
2	2.	2079.3
3	3.	2084.1
4	4.	3435.8
5	5.	3447.3
6	6.	3963.9

图 6-29　各阶模态频率

Step11：选择 Outline（分析树）→Modal（A5）→Analysis Settings（分析设置选项），在图 6-30 所示的 Details of “Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

Step12：重新计算得到的模态频率如图 6-31 所示。

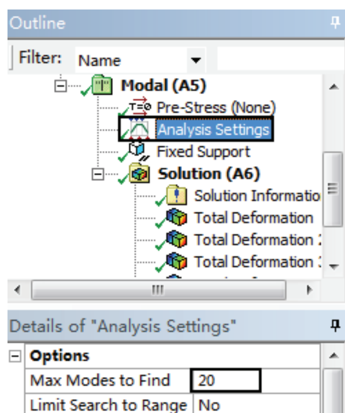
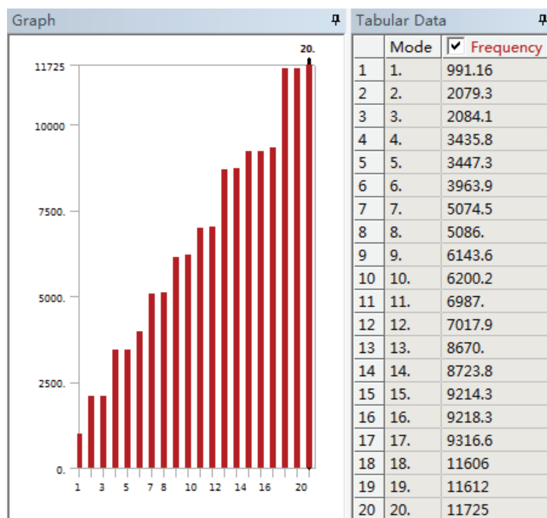


图 6-30　修改模态数量选项



Tabular Data

	Mode	Frequency [
1	1.	991.16
2	2.	2079.3
3	3.	2084.1
4	4.	3435.8
5	5.	3447.3
6	6.	3963.9
7	7.	5074.5
8	8.	5086.
9	9.	6143.6
10	10.	6200.2
11	11.	6987.
12	12.	7017.9
13	13.	8670.
14	14.	8723.8
15	15.	9214.3
16	16.	9218.3
17	17.	9316.6
18	18.	11606
19	19.	11612
20	20.	11725

图 6-31　各阶模态频率

Step13：单击工具栏中的按钮，在下拉的选项中选择 Four Viewports 选项，单击不同窗口显示不同模态下的变形，如图 6-32 所示。

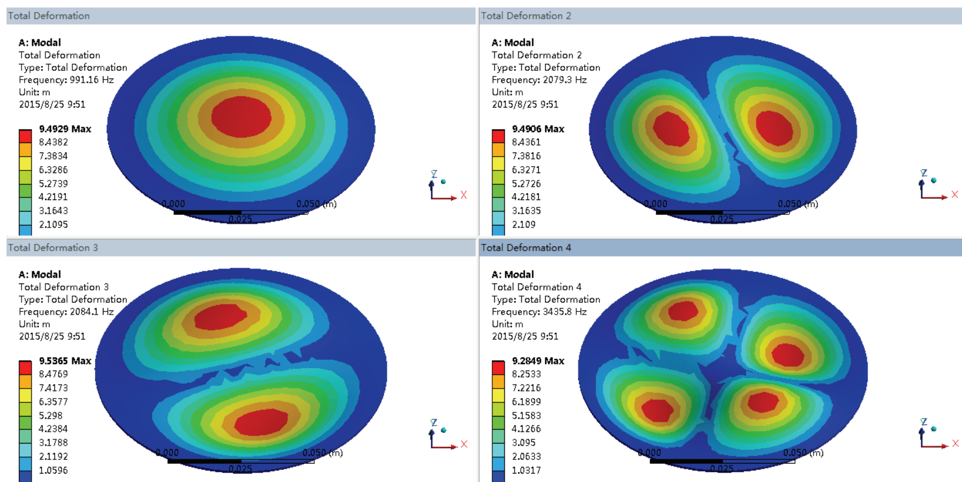


图 6-32 窗口形式

6.3.9 保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Modal.wbpj。

Step3： 单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

6.4 模态分析实例 2——有预应力模态分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的模态分析模块，计算方板在有预压力下的模态。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 有预应力模态分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter06\char06-2\ model_compression.wbpj

6.4.1 问题描述

如图 6-33 所示的模型，请用 ANSYS Workbench 分别计算同一零件在有压力工况下的固有频率。

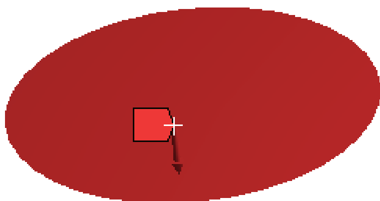


图 6-33 计算模型

6.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Custom Systems→Pre-Stress Modal（预应力模态分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）同时创建分析项目 A（静力分析）及项目 B（模态分析），如图 6-34 所示。

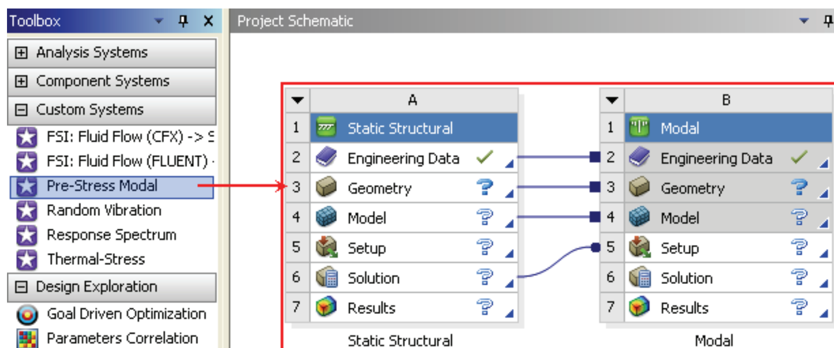


图 6-34 创建分析项目 A 及 B

6.4.3 创建几何体

Step1： 双击 A3 Geometry 栏进入到 DesignModeler 几何建模平台，单击 Sketching 面板，在 XYPlane 平面上绘制图 6-35 所示的圆形，并对圆形进行标注：D3=100mm。

Step2： 依次选择 Concept→Surface From Sketches 选项，如图 6-36 所示，在厚度栏中输入 1mm，单击工具栏中的 Generate 按钮生成几何模型。

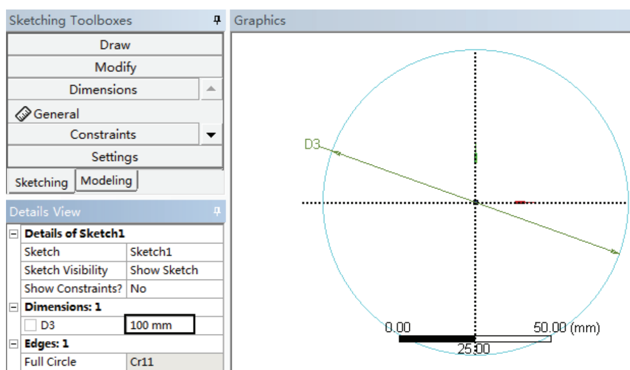


图 6-35 草绘图形

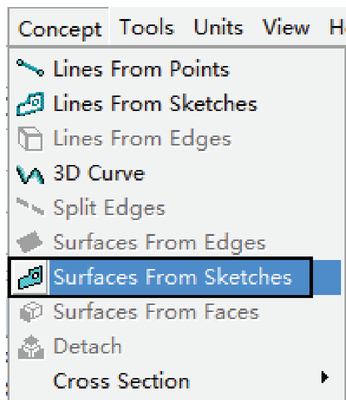


图 6-36 菜单命令

Step3： 单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6.4.4 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入图 6-37 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

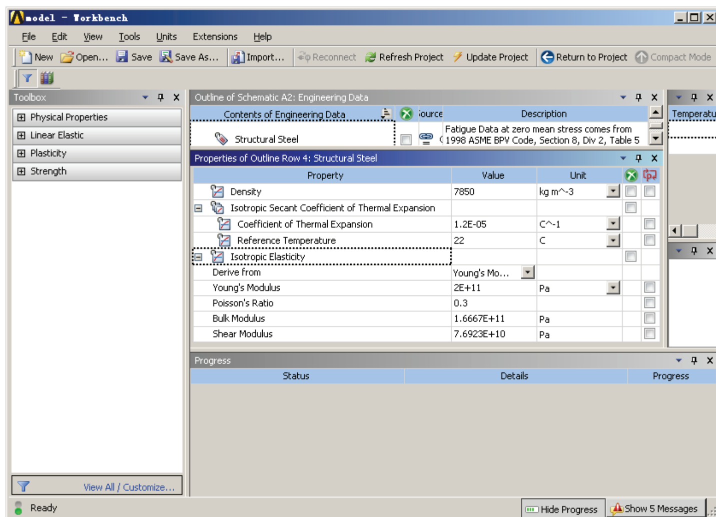


图 6-37 材料参数设置界面 1

Step2：在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）选项，此时的界面会变为图 6-38 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 消失，取代以 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites。

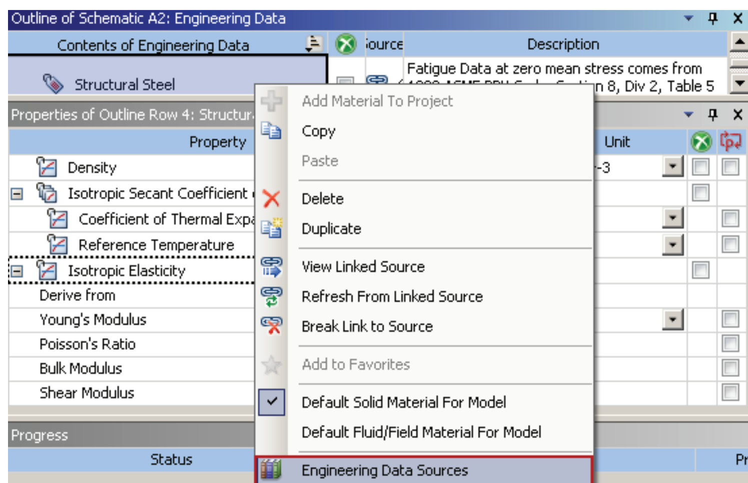


图 6-38 材料参数设置界面

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials，然后单击 Outline of Favorites 表中 A11 栏 Stainless Steel（不锈钢）后的 B11 栏的 ✚（添加）按钮，此时在



C11 栏中会显示（使用中的）标识，如图 6-39 所示，标识材料添加成功。

Step4： 同 Step2，在界面的空白处单击鼠标右键，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源），返回到初始界面中。

Step5： 根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3:Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 6-40 所示，本实例采用的是默认值。

提示： 用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

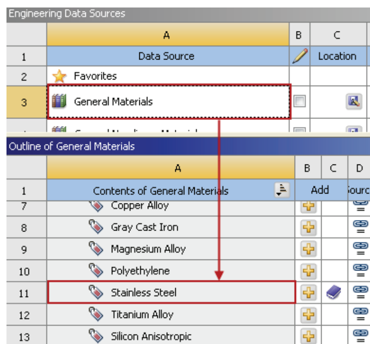


图 6-39　添加材料

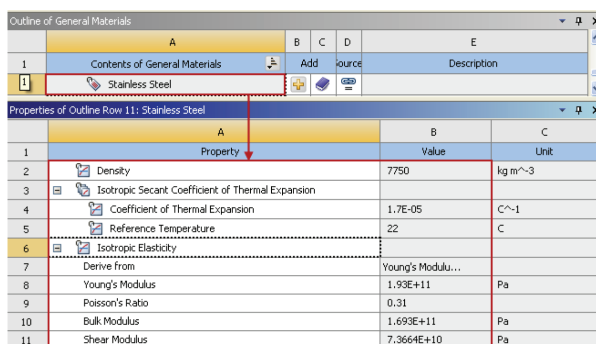


图 6-40　材料参数修改窗口

Step6： 单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6.4.5　添加模型材料属性

Step1： 双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 项，进入图 6-41 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

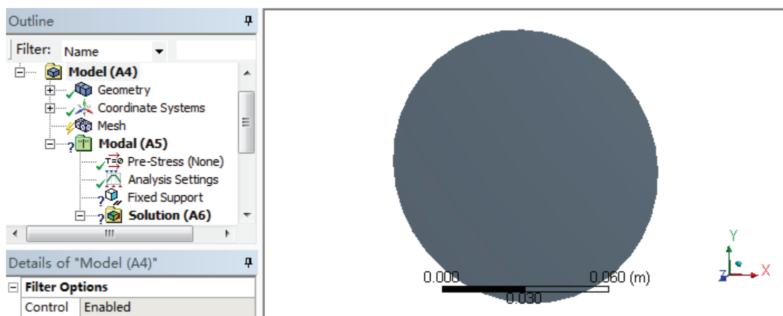


图 6-41　Mechanical 界面

Step2： 选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 model，此时即可在 Details of “model”（参数列表）中给模型添加材料，如图 6-42 所示。

Step3： 单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，选择即可将其添加到模型中去。如图 6-43 所示，表示材料已经修改成功。

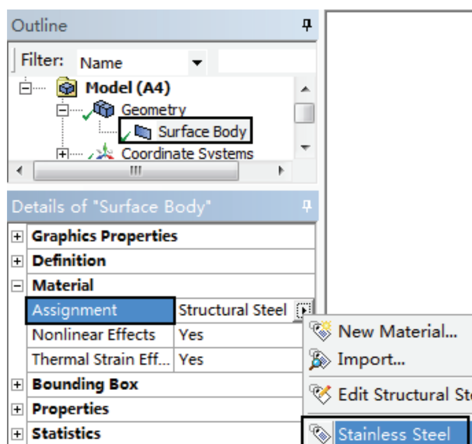


图 6-42 添加材料

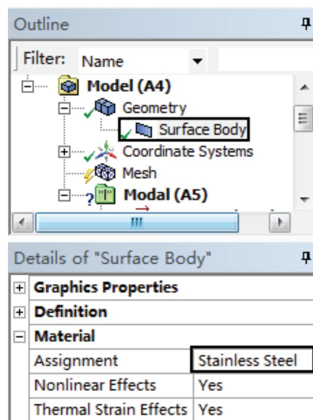


图 6-43 添加材料后的分析树

6.4.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 6-44 所示在 Relevance 栏中移动滑块到 100，将 Element Size 设置为 5.e-003m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分完成的网格效果如图 6-45 所示。

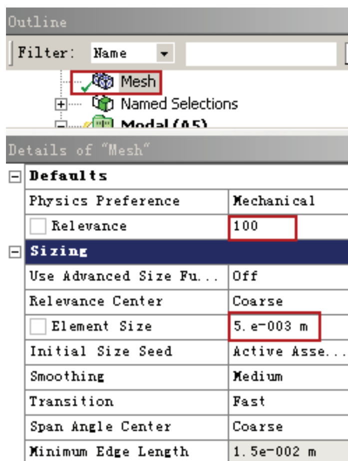


图 6-44 生成网格

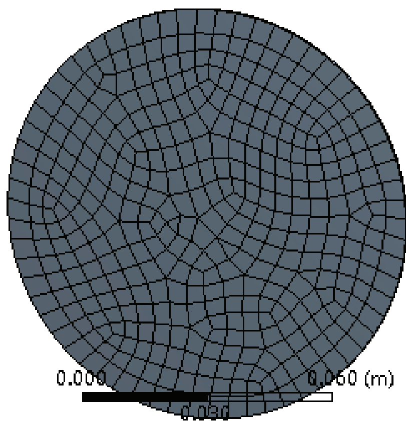


图 6-45 网格效果

6.4.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现图 6-46 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 6-47 所示。



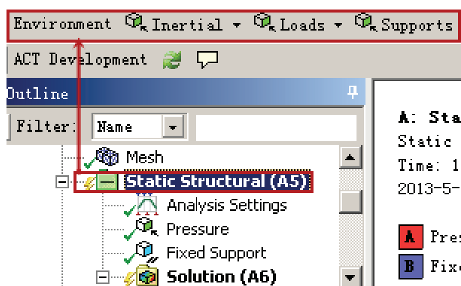


图 6-46　Environment 工具栏

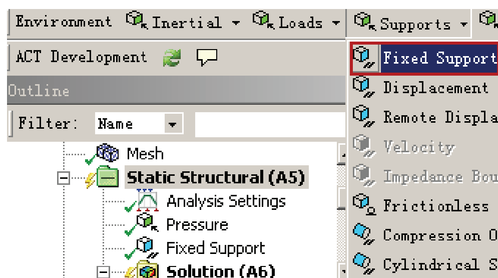


图 6-47　添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 6-48 所示。

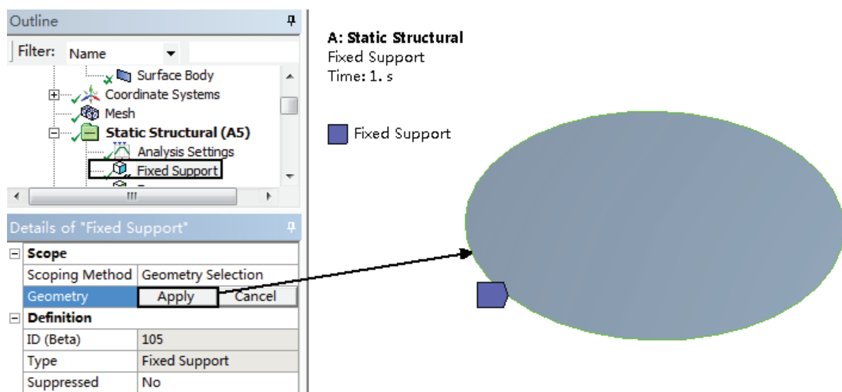


图 6-48　施加固定约束

Step4：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力载荷）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 6-49 所示。

Step5：选中 Force，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Force”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加力载荷，如图 6-50 所示。

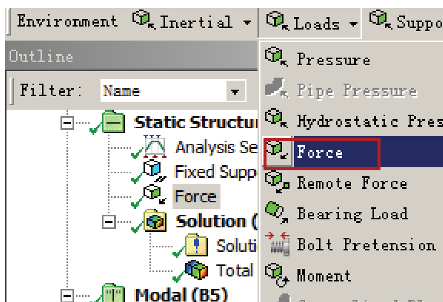


图 6-49　添加固定约束

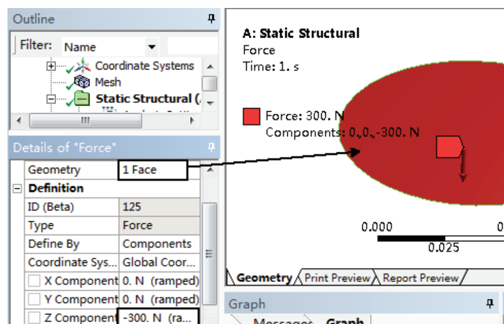


图 6-50　施加力载荷

在 Define By 栏中选择 Components 选项。

在 Z Component 栏中输入-300N，其余默认即可。

Step6： 在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令。

Step7： 在后处理中添加 Total Deformation 命令，并进行后处理运算，变形云图如图 6-51 所示。

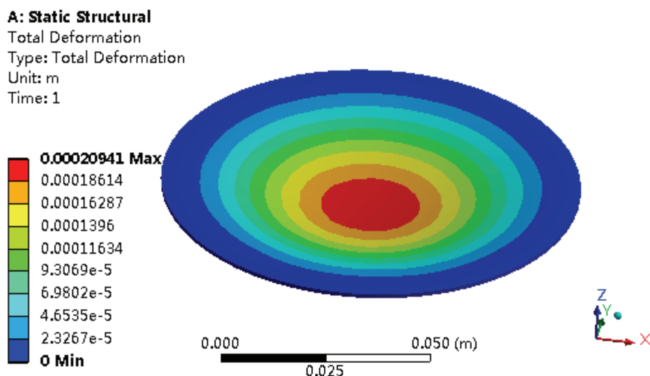


图 6-51　变形云图

6.4.8 模态分析

在 Outlines（分析树）中的 Modal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，如图 6-52 所示。

注意：计算时间跟网格疏密程度和计算机性能等有关。

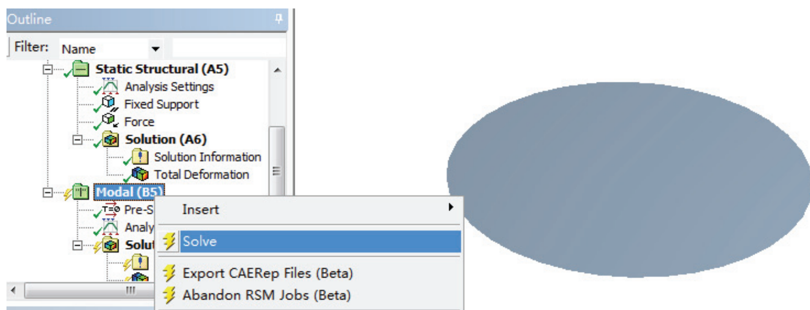


图 6-52　Solution 工具栏

6.4.9 后处理

Step1： 选择 Solution（B6）工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-53 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step2： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Equivalent All Results 命令，如图 6-54 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在

求解，当求解完成后进度条自动消失。

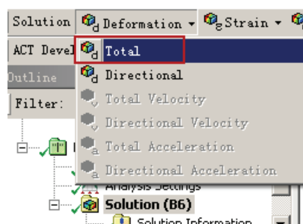


图 6-53　添加变形选项

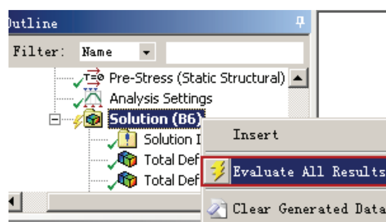


图 6-54　快捷菜单

Step3： 选择 Outline（分析树）→Solution→Total Deformation（总变形），此时会出现图 6-55 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step4： 图 6-56 所示的二阶模态总变形分析云图。

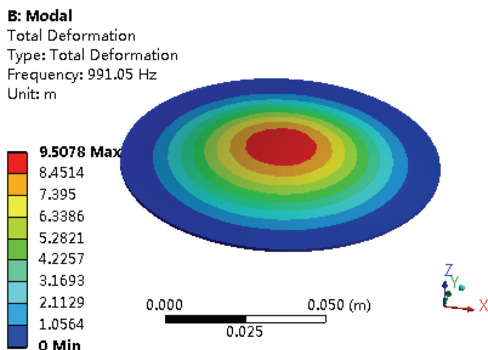


图 6-55　一阶模态总变形分析云图

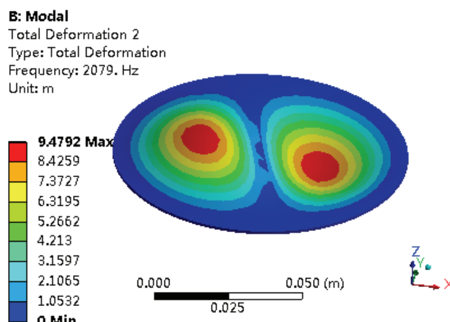


图 6-56　二阶模态总变形分析云图

Step5： 图 6-57 所示的三阶模态总变形分析云图。

Step6： 图 6-58 所示的四阶模态总变形分析云图。

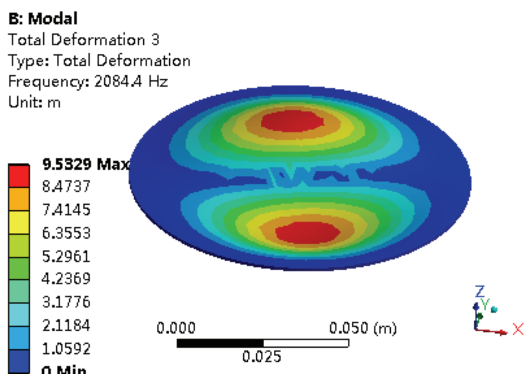


图 6-57　三阶模态总变形分析云图

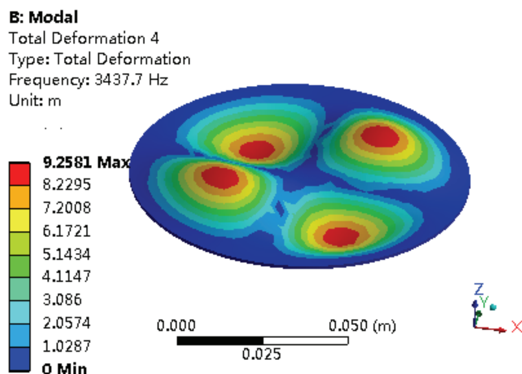


图 6-58　四阶模态总变形分析云图

Step7： 图 6-59 所示的五阶模态总变形分析云图。

Step8： 图 6-60 所示的六阶模态总变形分析云图。

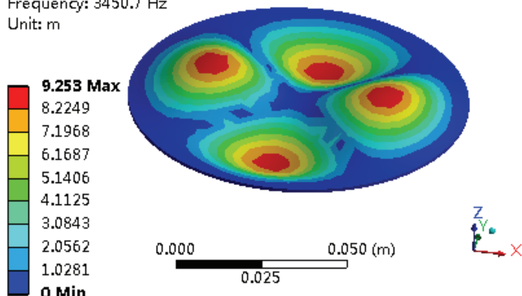


图 6-59　五阶模态总变形分析云图

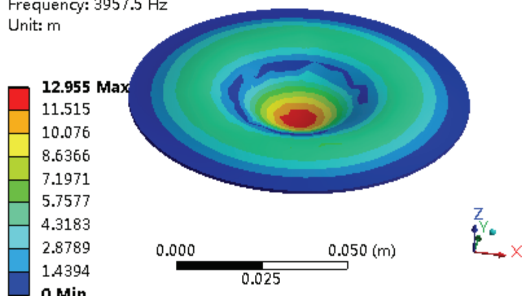
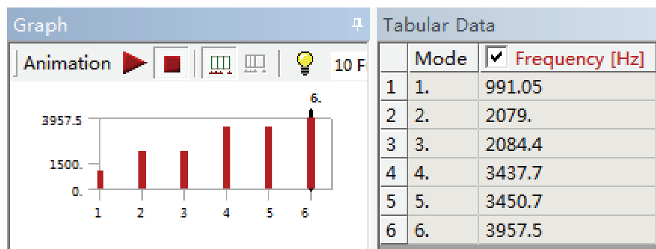


图 6-60　六阶模态总变形分析云图

Step9： 图 6-61 所示为模型前 6 阶模态频率，Workbench 模态计算时的默认模态数量为 6。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	991.05
2	2.	2079.
3	3.	2084.4
4	4.	3437.7
5	5.	3450.7
6	6.	3957.5

图 6-61　各阶模态频率

6.4.10 保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 model_compression.wbpj。

Step3： 单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

6.5　本章小结

本章通过简单的例子介绍了模态分析的方法及操作过程，读者完成本章的实例后，应该熟练掌握零件模态分析的基本方法，了解模态分析的应用，同时应该掌握模态分析的分析方法。

另外，请读者参考帮助文档，对含有阻尼系数的零件进行模态分析，并对比分析有无阻尼系数对零件变形的影响。

第 7 章　谐响应分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的谐响应分析模块进行讲解，并通过典型应用对各种分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
谐响应分析应用	√			
谐响应分析的意义		√	√	√
ANSYS Workbench 谐响应分析		√	√	√
ANSYS Workbench 谐响应分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 谐响应后处理			√	√

7.1　谐响应分析基础

7.1.1　谐响应分析简介

谐响应分析也称为频率响应分析或者扫频分析，用于确定结构在已知频率和幅值的正弦载荷作用下的稳态响应。

如图 7-1 所示，谐响应分析是一种时域分析，计算结构响应的时间历程，但是局限于载荷是简谐变化的情况，只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑激励开始时的瞬态振动。

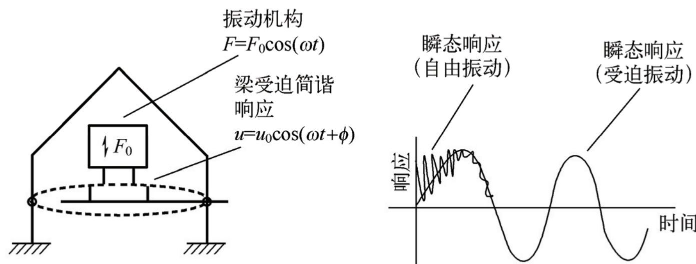


图 7-1　谐响应分析

谐响应分析可以进行扫频分析，分析结构在不同频率和幅值的简谐载荷作用下的响应，从而探测共振，指导设计人员避免结构发生共振（例如，借助阻尼器来避免共

振），确保一个给定的结构能够经受住不同频率的各种简谐载荷（例如，不同速度转动的发动机）。

谐响应分析的应用非常广泛，例如，旋转机械的偏心转动力将产生简谐载荷，因此旋转设备（如压缩机、发动机、泵、涡轮机械等）的支座、固定装置和部件等经常需要应用谐响应分析来分析它们在各种不同频率和幅值的偏心简谐载荷作用下的刚强度。另外，流体的漩涡运动也会产生简谐载荷，谐响应分析也经常被用于分析受涡流影响的结构，如涡轮叶片、飞机机翼、桥、塔等。

7.1.2 谐响应分析的载荷与输出

谐响应分析的载荷是随时间正弦变化的简谐载荷，这种类型的载荷可以用频率和幅值来描述。谐响应分析可以同时计算一系列不同频率和幅值的载荷引起的结构的响应，这就是所谓的频率扫描（扫频）分析。

简谐载荷可以是加速度或者力，载荷可以作用于指定节点或者基础（所有约束节点），而且同时作用的多个激励载荷可以有不同的频率以及相位。

简谐载荷有两种描述方法，一种方法是采用频率、幅值、相位角来描述；另一种是通过频率、实部和虚部来描述。

谐响应分析的计算结果包括结构任意点的位移或应力的实部、虚部、幅值以及等值图，实部和虚部反映了结构响应的相位角，如果定义了非零的阻尼，则响应会与输入载荷之间有相位差。

7.1.3 谐响应分析通用方程

由经典力学理论可知，物体的动力学通用方程是：

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}'' + \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}' + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{F}(t) \tag{7-1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 是质量矩阵；$\boldsymbol{C}$ 是阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 是刚度矩阵；$\boldsymbol{x}$ 是位移矢量；$\boldsymbol{F}(t)$ 是力矢量；$\boldsymbol{x}'$ 是速度矢量；$\boldsymbol{x}''$ 是加速度矢量。

而谐响应分析中，上式右侧为：$F = F_0\cos(\omega t)$

7.2 谐响应分析实例1——梁单元谐响应分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的谐响应分析模块，对板单元模型进行谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 谐响应分析的方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter07\char07-1\beam.scdoc
结果文件	网盘\Chapter07\char07-1\beam_Response.wbpj

7.2.1 问题描述

如图 7-2 所示的梁单元模型，计算在两个简谐力作用下，梁单元的响应。

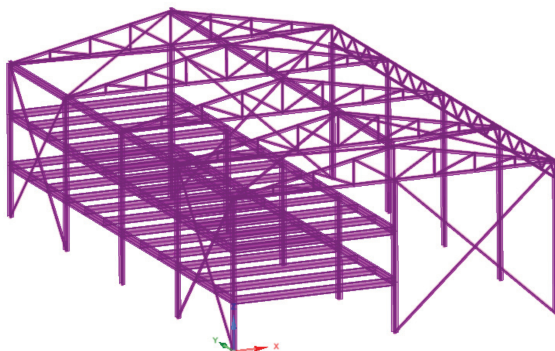


图 7-2　梁单元模型

7.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：在工程管理窗口中创建图 7-3 所示相关流程分析图。

Step3：双击 A3 进入到几何建模平台。

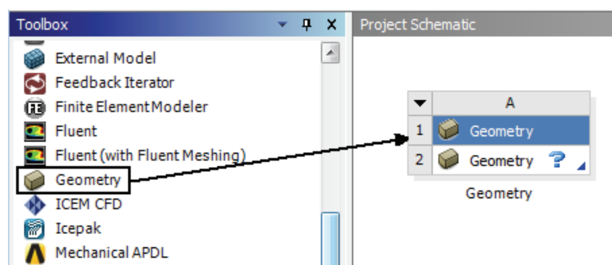


图 7-3　流程分析图

Step4：如图 7-4 所示，右键单击项目 A 中的 A2（Geometry），在弹出的快捷菜单中选择导入几何，并选中 beam.agdb，并双击 A2（Geometry），此时会加载 DesignModeler 平台。

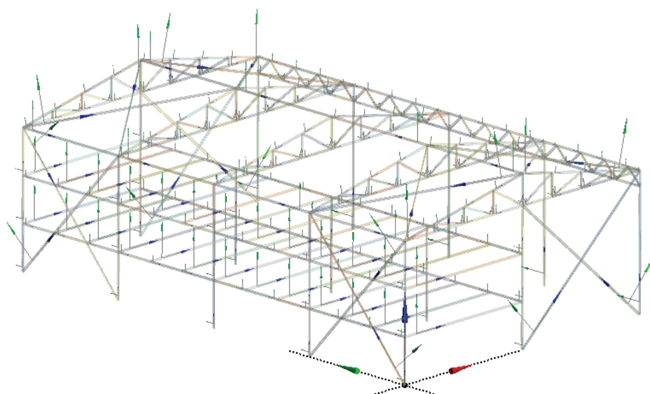


图 7-4　几何模型

Step5： 单击按钮关闭 DesignModeler 平台。

7.2.3 创建模态分析项目

Step1： ANSYS Workbench 启动后如图 7-5 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Modal（模态分析）命令直接拖拽到项目 A（几何）的 A2（Geometry）中。

Step2： 如图 7-6 所示，此时项目 A 的几何数据将共享在项目 B 中。

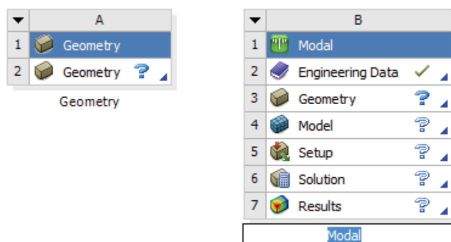


图 7-5 创建模态分析

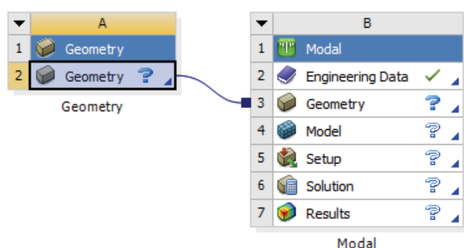


图 7-6 工程数据共享

7.2.4 材料选择

Step1： 双击项目 B 中的 B2（Engineering Data），弹出图 7-7 所示的工程材料库，在工具栏中单击按钮，此时弹出工程材料数据选择库。

Step2： 在材料库中选择图 7-8 所示的 Structural Steel 材料，此时会在 C8 栏中出现图标，表示此材料被选中，返回 Workbench 主窗口。

Outline of Schematic B2: Engineering Data

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Aluminum Alloy			General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	2770	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	2.3E-05	C^-1		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's...			
8	Young's Modulus	7.1E+10	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.33			
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa		
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa		
12	Field Variables				
13	Temperature	Yes			
14	Shear Angle	No			
15	Degradation Factor	No			

图 7-7 工程材料库

Engineering Data Sources

	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
2	Favorites			Quick access list and default items
3	General Materials			General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials			General use material samples for use in non-linear analyses.

Outline of General Materials

	A	B	C	D	E
1	Contents of General Materials	Add		Source	Description
12	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m^-3
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C^-1
5	Reference Temperature	22	C
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's M...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0.3	

图 7-8 材料选择

7.2.5 施加载荷与约束

Step1： 此时双击项目 B 中的 B4（Model）命令，进入图 7-9 所示 Mechanical 界面，在

该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

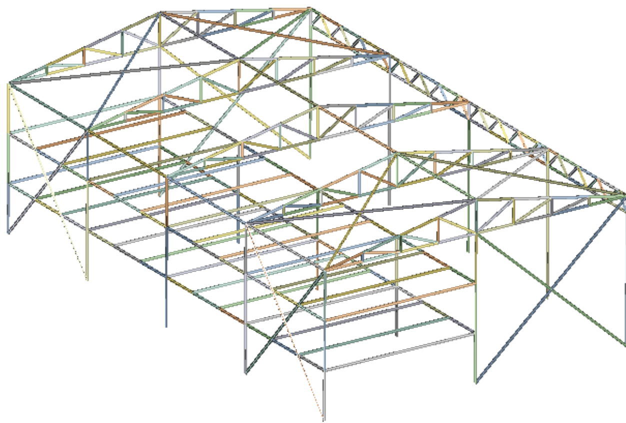


图 7-9　Mechanical 界面

Step2： 如图 7-10 所示，选择 Outlines（分析树）→Model（B4）→Geometry→“线条”菜单，在下面出现的 Details of “Multiple Selection”面板中的 Material→Assignment 栏中选择 Structural Steel。

注：此处需要选中全部几何。

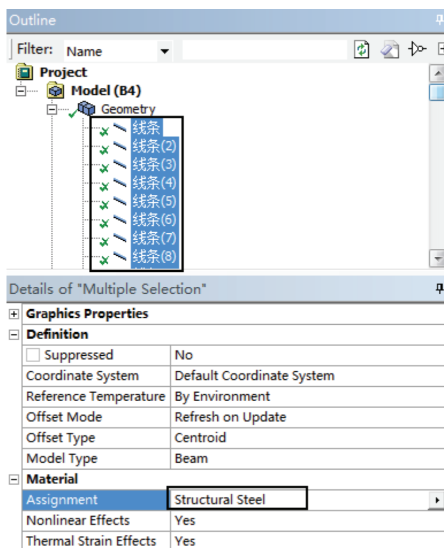


图 7-10　选择材料

Step3： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Model（B4）→Mesh 选项，如图 7-11 所示，在出现的 Details of Mesh 面板中的 Relevance 栏中移动滑块到 100。

Step4： 如图 7-12 所示，右键单击 Mesh 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分网格。

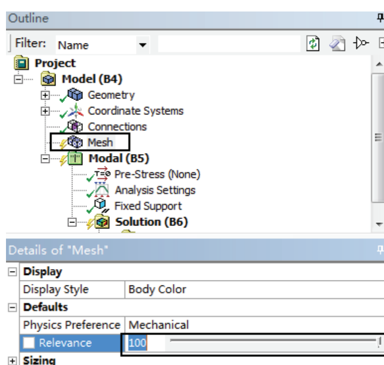


图 7-11　网格设置

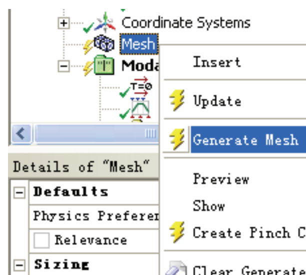


图 7-12　快捷菜单

Step5：划分完的几何网格模型如图 7-13 所示。

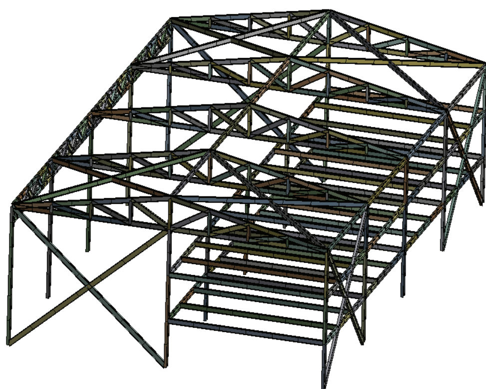


图 7-13　几何网格模型

Step6：固定梁单元的下侧的 15 个节点，如图 7-14 所示。

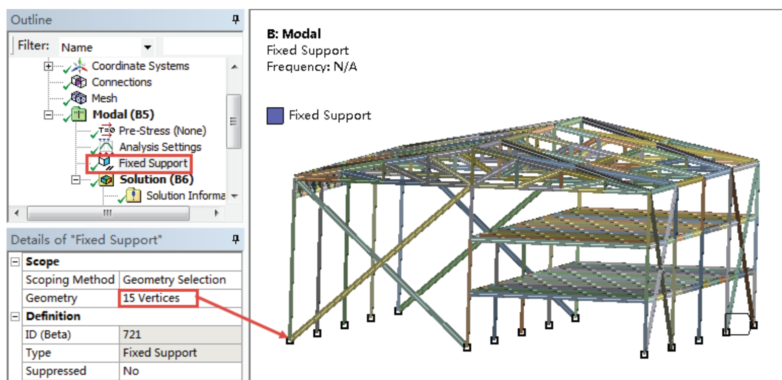


图 7-14　约束固定节点

7.2.6 模态求解

右键单击 Modal（B5），此时弹出一个快捷菜单，如图 7-15 所示，在快捷菜单中选择 Solve 命令，进行模态分析，此时默认的阶数为 6 阶。

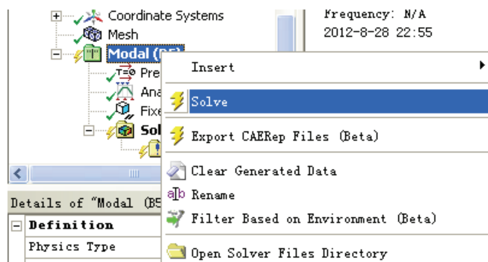


图 7-15　Solve 命令

7.2.7 后处理

Step1：右键选择 Solution，如图 7-16 所示，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 命令。

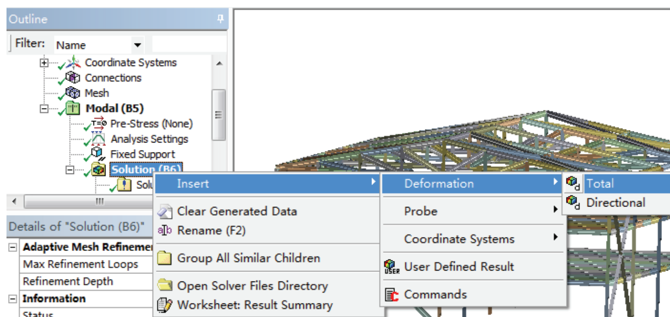


图 7-16　添加变形选项

Step2：右键单击 Solution（B6）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

Step3：计算完成后，选择 Total Deformation 命令，结果如图 7-17 所示，此时在图形操作区显示位移响应云图，在下面的 Details of “Total Deformation”面板中的 Mode 栏的数值为 1，表示是第一阶模态的位移响应。

Step4：前 6 阶固有频率如图 7-18 所示。

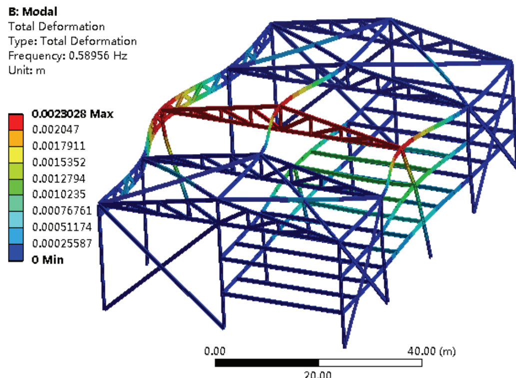


图 7-17　计算位移

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	0.58956
2	2.	0.72524
3	3.	0.99863
4	4.	1.0095
5	5.	1.068
6	6.	1.0832

图 7-18　前 6 阶固有频率

Step5： 如图 7-19 所示，选中 Graph 栏中的所有模态柱状图，单击鼠标右键在弹出的快捷菜单中选择 Create Mode Shape Results 选项。

Step6： 如图 7-20 所示，此时在 Solution 选项下面自动创建 6 个后处理选项，分别显示不同频率下的总变形。

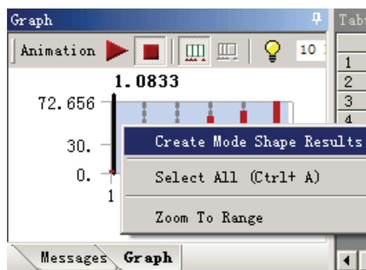


图 7-19　快捷菜单

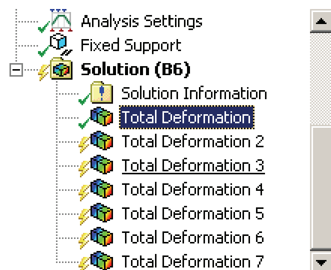


图 7-20　后处理选项

Step7： 计算完成后的各阶模态变形云图如图 7-21 所示。

Step8： 单击按钮关闭 Mechanical 界面。

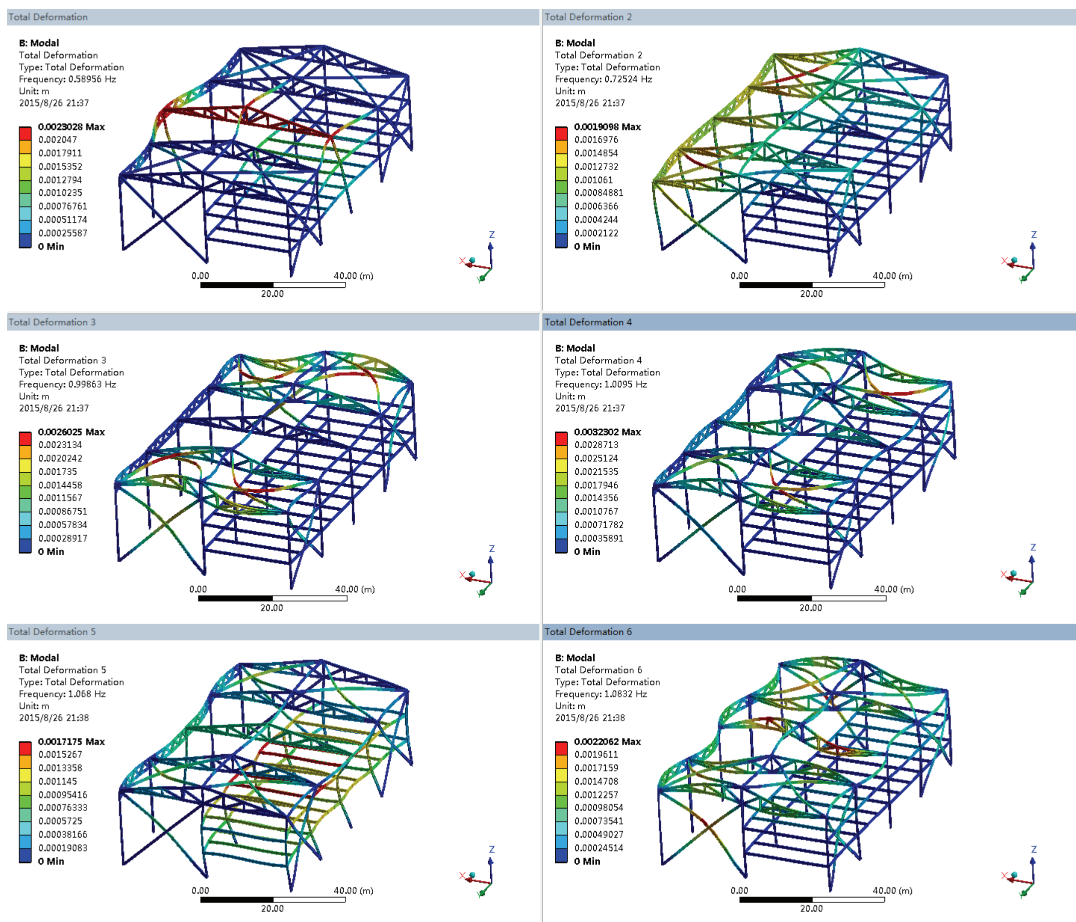


图 7-21　各阶模态变形云图

7.2.8 创建谐响应分析项目

Step1：如图 7-22 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Harmonic Response（谐响应分析）命令直接拖拽到项目 B（模态分析）的 B6 Solution 中。

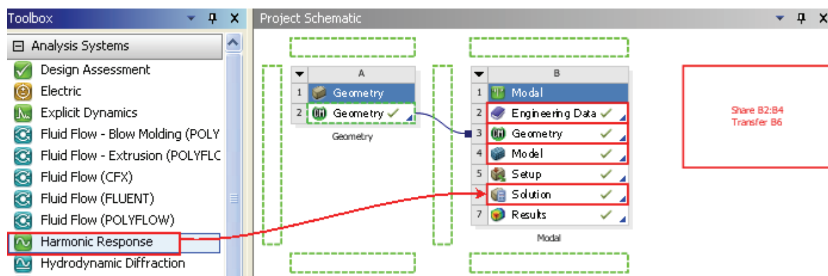


图 7-22 创建谐响应分析

Step2：如果 7-23 所示，此时项目 B 的所有前处理数据已经全部导入项目 C 中，此时如果双击项目 C 中的 C5Setup 命令即可直接进入 Mechanical 界面。

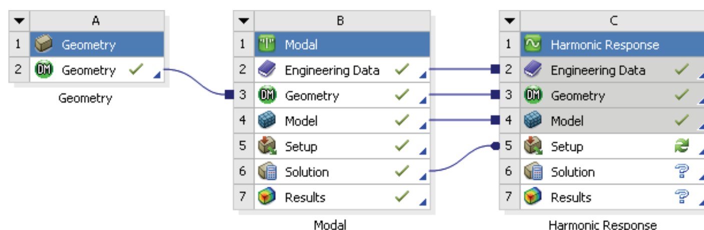


图 7-23 工程数据共享

7.2.9 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 C 中的 C5 栏 Setup 选项，进入图 7-24 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

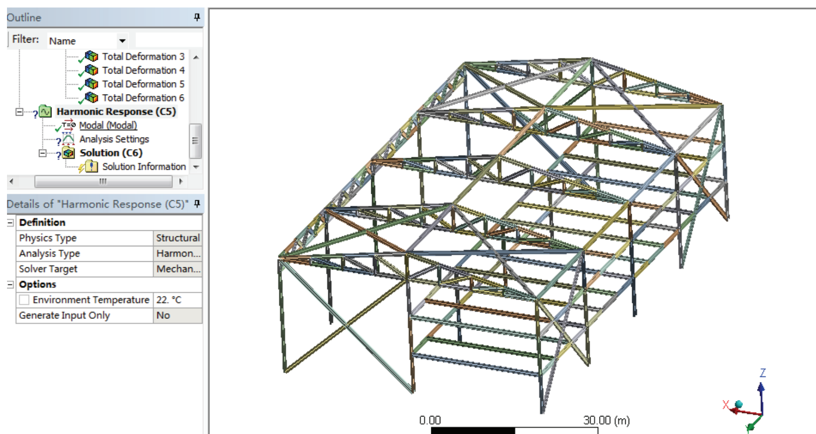


图 7-24 Mechanical 界面

Step2： 在 Outlines（分析树）中的 Modal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令。

Step3： 如图 7-25 所示，单击 Outlines（分析树）→Harmonic Response（C5）→Analysis Settings 选项，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”设置面板的 Options 中进行如下更改。

在 Range Minimum 中输入 0Hz，在 Range Maximum 中输入 1.5Hz，在 Solution Interval 中输入 10。

Step4： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Harmonic Response（C5）选项，如图 7-26 所示，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项。

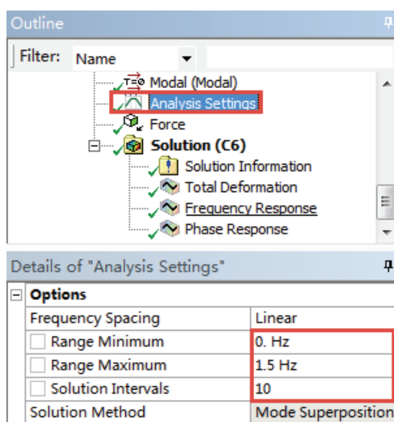


图 7-25 频率设定

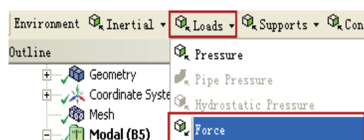


图 7-26 施加外力

Step5： 如图 7-27 所示，选中 Force，单击 Details of “Force”面板中 Scope→Geometry 栏中的中间板单元，在 Define By 栏中选择 Components 选项，在 Z Component 栏中输入 -25000N，在 Phase Angle 栏中输入 0°，完成力的设置。

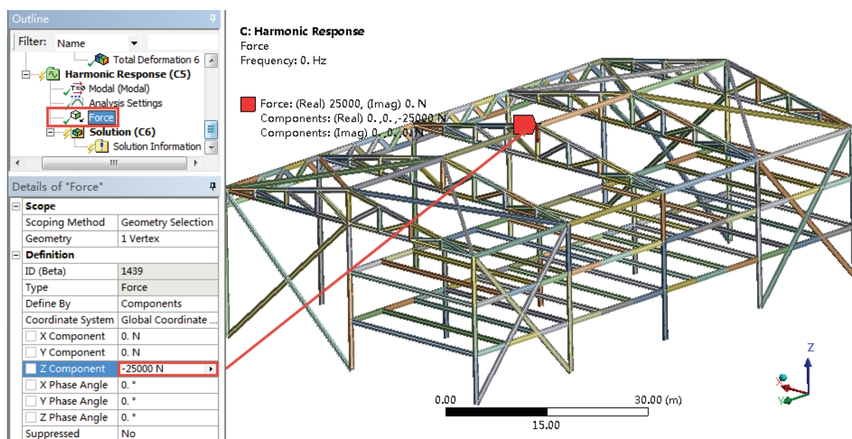


图 7-27 数值设定

7.2.10 谐响应计算

如图 7-28 所示，右键单击 Harmonic Response（C5）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

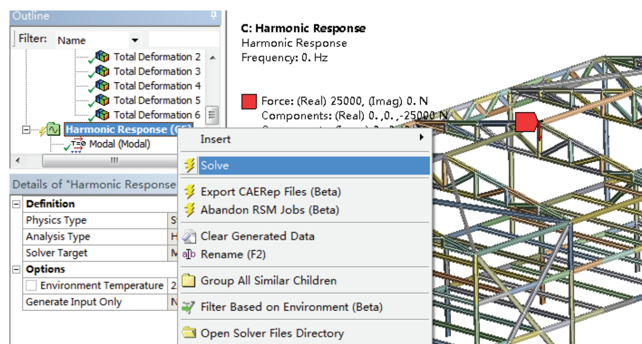


图 7-28 求解

7.2.11 结果后处理

Step1： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（C6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Deformation→Total 命令，如图 7-29 所示，在后处理器中添加位移响应命令。

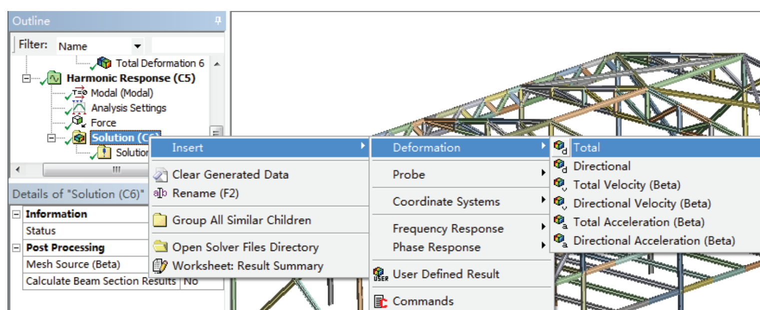


图 7-29 添加位移响应

Step2： 图 7-30 所示为频率为 1.5Hz，相角为 0° 时的位移响应云图。

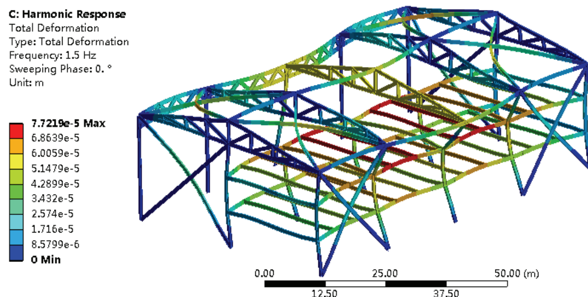


图 7-30 位移响应云图

Step3： 如图 7-31 所示，在 Solution 工具栏中选择 Frequency Response→Deformation 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项，在变形选项卡中做如下操作：

在 Geometry 栏中保证所有梁单元被选中。

在 Orientation 栏中选择 Y Axis 选项，其余默认即可。

Step4： 右键单击 Solution 工具栏中的 Frequency Response 命令，在弹出来的图 7-32 所示的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

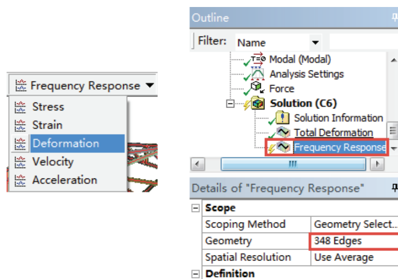


图 7-31　添加变形选项

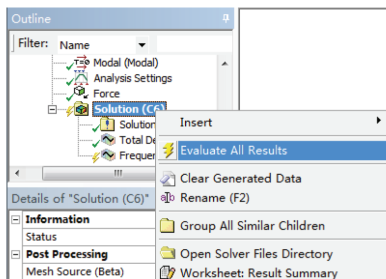


图 7-32　计算位移

Step5： 选择 Outline（分析树）→Solution（C6）→Frequency Response，此时会出现图 7-33 所示的节点随频率变化曲线。

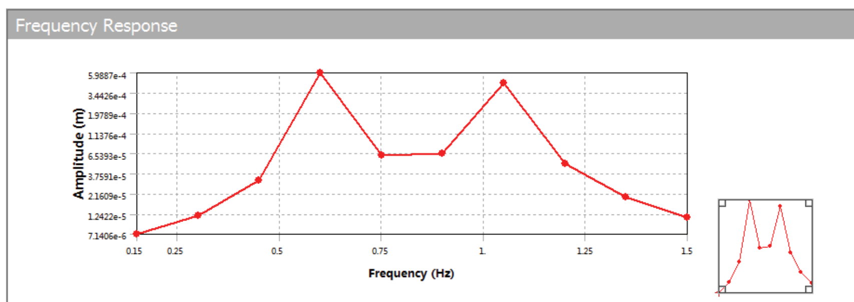
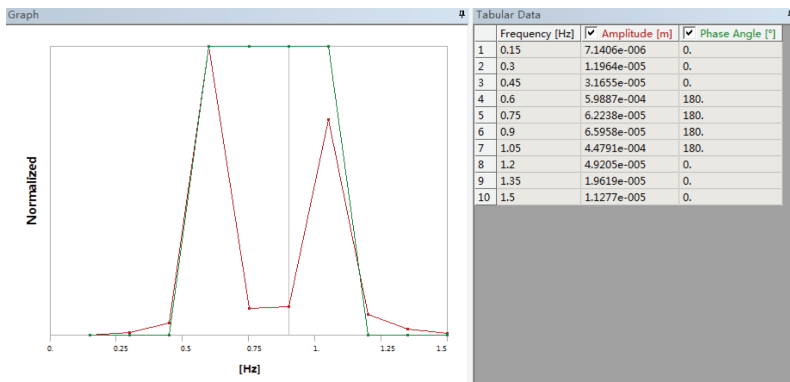


图 7-33　变化曲线

Step6： 图 7-34 所示为梁单元各阶响应频率及相角。



	Frequency [Hz]	Amplitude [m]	Phase Angle [°]
1	0.15	7.1406e-006	0.
2	0.3	1.1964e-005	0.
3	0.45	3.1655e-005	0.
4	0.6	5.9887e-004	180.
5	0.75	6.2238e-005	180.
6	0.9	6.5958e-005	180.
7	1.05	4.4791e-004	180.
8	1.2	4.9205e-005	0.
9	1.35	1.9619e-005	0.
10	1.5	1.1277e-005	0.

图 7-34　各阶响应频率及相角

Step7：如图 7-35 所示，选择圆面然后在 Solution 工具栏中执行 Phase Response→Deformation 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项，在变形选项卡中进行如下操作。

在 Geometry 栏中保证所有梁单元被选中。

在 Frequency 栏中输入 0.5Hz，其余默认即可。

Step8：图 7-36 所示为梁单元各阶响应角及变形。

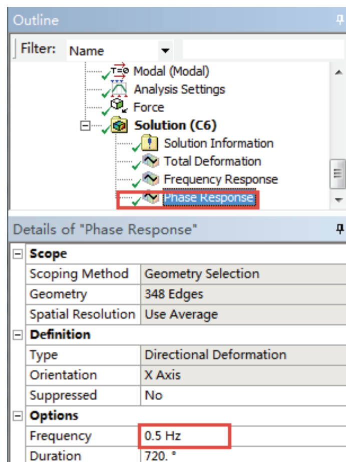
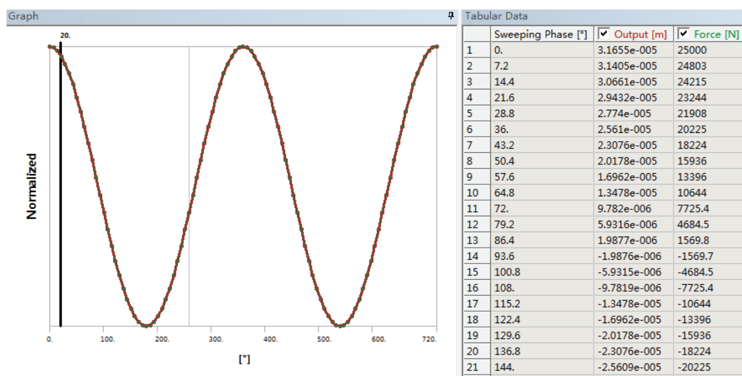


图 7-35　添加变形选项



	Sweeping Phase [°]	Output [m]	Force [N]
1	0.	3.1655e-005	25000
2	7.2	3.1405e-005	24803
3	14.4	3.0661e-005	24215
4	21.6	2.9432e-005	23244
5	28.8	2.774e-005	21908
6	36.	2.561e-005	20225
7	43.2	2.3076e-005	18224
8	50.4	2.0178e-005	15936
9	57.6	1.6962e-005	13396
10	64.8	1.3478e-005	10644
11	72.	9.782e-006	7725.4
12	79.2	5.9316e-006	4684.5
13	86.4	1.9877e-006	1569.8
14	93.6	-1.9876e-006	-1569.7
15	100.8	-5.9315e-006	-4684.5
16	108.	-9.7819e-006	-7725.4
17	115.2	-1.3478e-005	-10644
18	122.4	-1.6962e-005	-13396
19	129.6	-2.0178e-005	-15936
20	136.8	-2.3076e-005	-18224
21	144.	-2.5609e-005	-20225

图 7-36　各阶变形响应

7.2.12 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存为 beam_Response 文件名。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

7.3　谐响应分析实例 2——谐响应分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的谐响应分析模块，对实体单元模型进行谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 谐响应分析的方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter07\char07-2\solid.agdb
结果文件	网盘\Chapter07\char07-2\ Response.wbpj

7.3.1 问题描述

如图 7-37 所示的实体模型，计算一端有力作用下实体结构的响应。

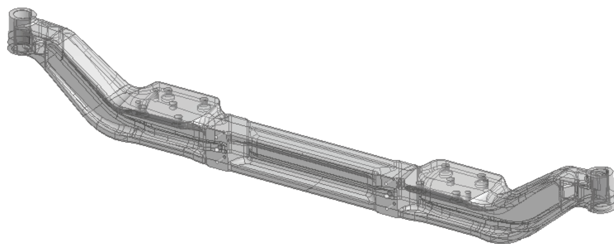


图 7-37 实体模型

7.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2： 在工程管理窗口中创建图 7-38 所示相关流程分析图。

Step3： 双击 A3 进入到几何建模平台。

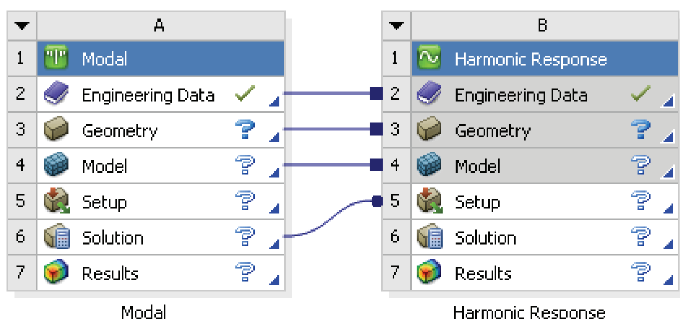


图 7-38 流程图

Step4： 如图 7-39 所示，右键选择 A3，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…，在弹出的“打开”对话框中选择文件名为 solid.agdb 的几何文件，然后单击“打开”按钮。

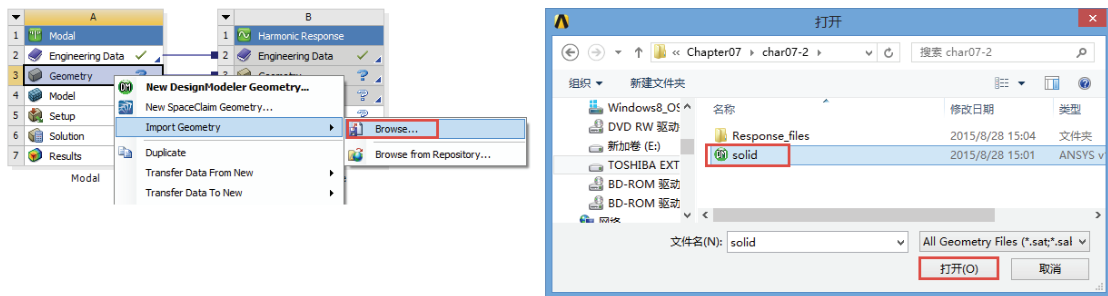


图 7-39 导入几何模型

Step5： 单击☒按钮关闭 DesignModeler 平台。

7.3.3 材料选择

Step1：双击项目 A 中的 A2（Engineering Data），弹出图 7-40 所示工程材料库，在工具栏中单击按钮，此时弹出工程材料数据选择库。

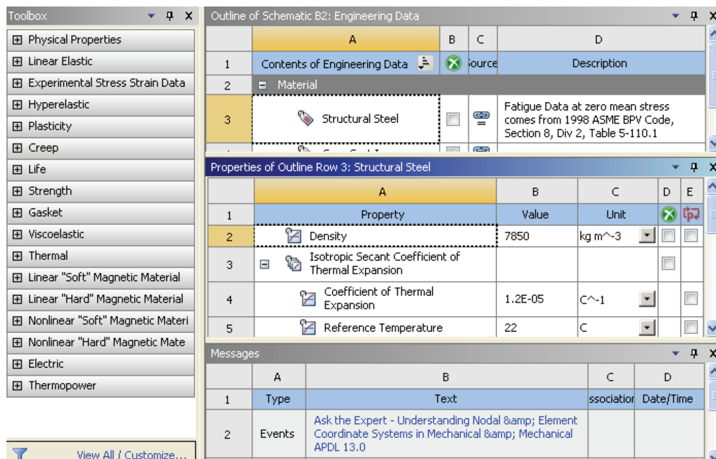


图 7-40　工程材料数据选择库

Step2：在材料库中选择图 7-41 所示的 Aluminum Alloy 材料，此时会在 C5 栏中出现图标，表示此材料被选中，返回 Workbench 主窗口。

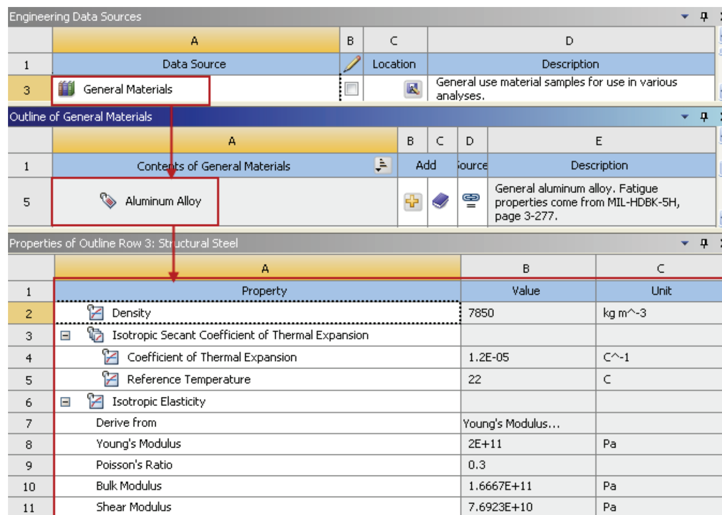


图 7-41　材料选择

7.3.4 施加载荷与约束

Step1：此时双击项目 A 中的 A4（Model）命令，进入图 7-42 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

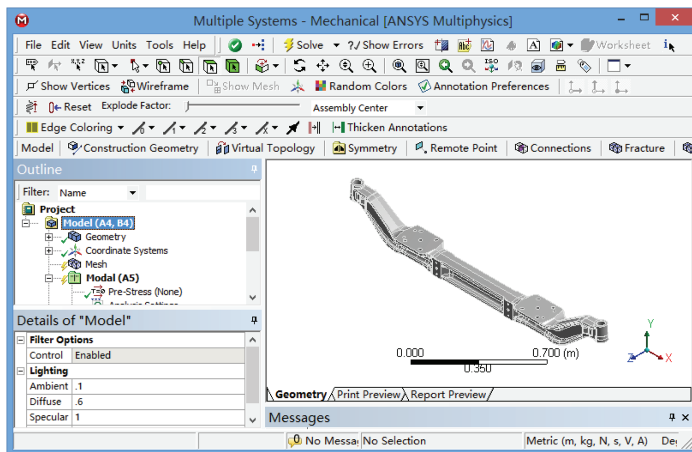


图 7-42 Mechanical 界面

Step2： 如图 7-43 所示，在 Outlines（分析树）中选择 Model（A4，B4）→Geometry→Solid 菜单命令，在下面出现的 Details of “Solid”面板中的 Material→Assignment 栏中选择 Aluminum Alloy 选项。

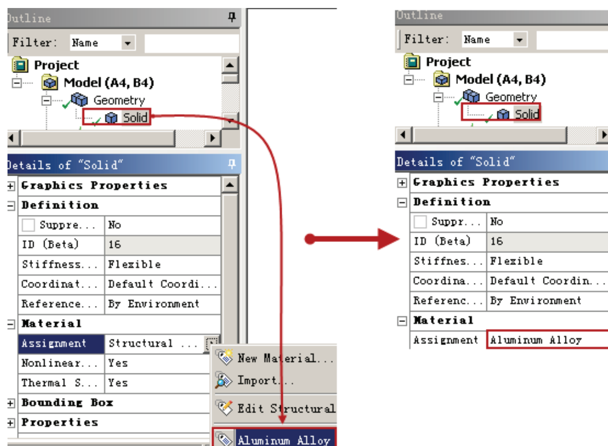


图 7-43 选择材料

Step3： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Model（A4，B4）→Mesh 选项，如图 7-44 所示，在出现的 Details of Mesh 面板中的 Relevance 栏中移动滑块到 100。

Step4： 如图 7-45 所示，右键单击 Mesh 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分网格。

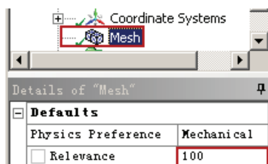


图 7-44 网格设置

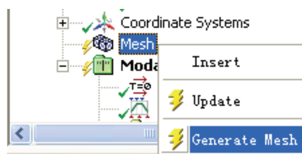


图 7-45 快捷菜单

Step5：划分完的几何网格模型如图 7-46 所示。

注：本案例的重点不是网格划分，故并未对网格进行详细介绍，请读者参考网格划分章节进行网格设定。

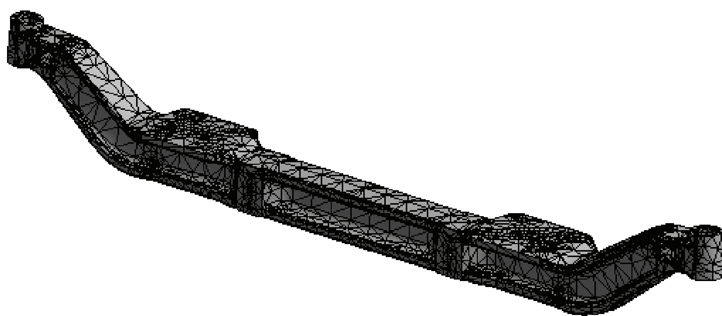


图 7-46　几何网格模型

Step6：固定几何实体的两侧的圆柱孔，如图 7-47 所示。

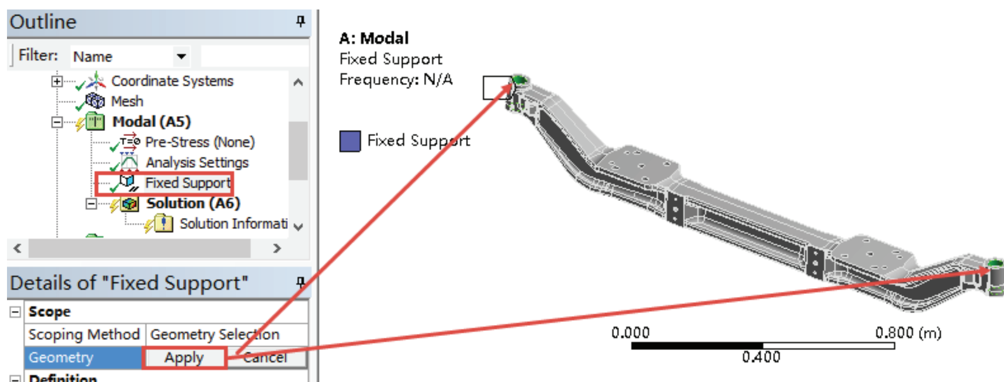


图 7-47　约束

7.3.5 模态求解

右键单击 Modal（A5），此时弹出一个快捷菜单，在快捷菜单中选择 Solve 命令，进行模态分析，此时默认的阶数为 6 阶。

7.3.6 后处理

Step1：右键选择 Solution 选项，如图 7-48 所示，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 命令。

Step2：右键单击 Solution（A6）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

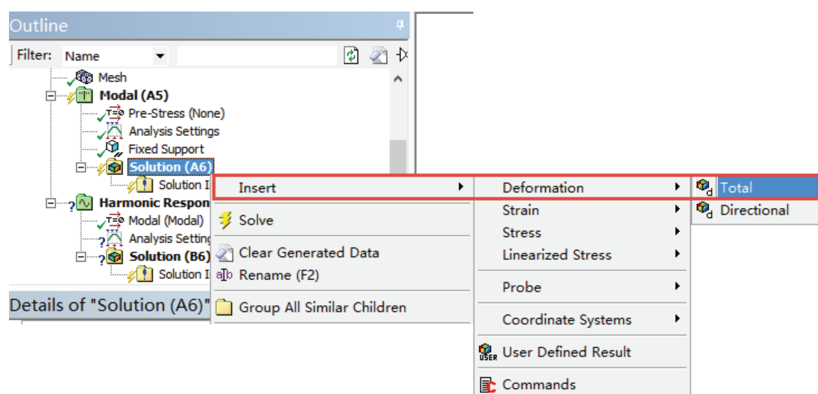


图 7-48 添加变形选项

Step3： 计算完成后，选择 Total Deformation 命令，此时在图形操作区显示位移响应云图（见图 7-49），在下面的 Details of “Total Deformation”面板中的 Mode 栏的数值为 1，表示是第一阶模态的位移响应。

Step4： 前六阶固有频率如图 7-50 所示。

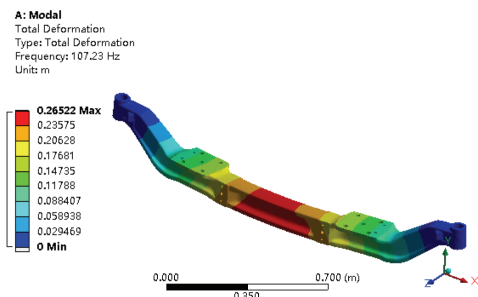


图 7-49 计算位移响应云图

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	107.23
2	2.	271.21
3	3.	297.18
4	4.	417.55
5	5.	450.93
6	6.	604.54

图 7-50 前六阶固有频率

Step5： 如图 7-51 所示，选中 Graph 栏中的所有模态柱状图，单击鼠标右键在弹出的快捷菜单中选择 Create Mode Shape Results 选项。

Step6： 如图 7-52 所示，此时在 Solution 选项下面自动创建 6 个后处理选项，分别显示不同频率下的总变形。

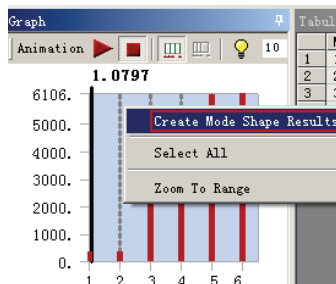


图 7-51 快捷菜单

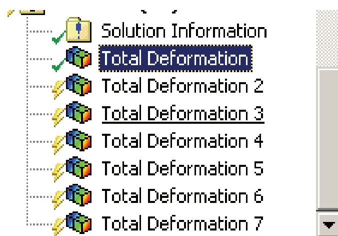


图 7-52 后处理选项

Step7： 计算完成后的各阶模态变形云图如图 7-53 所示。

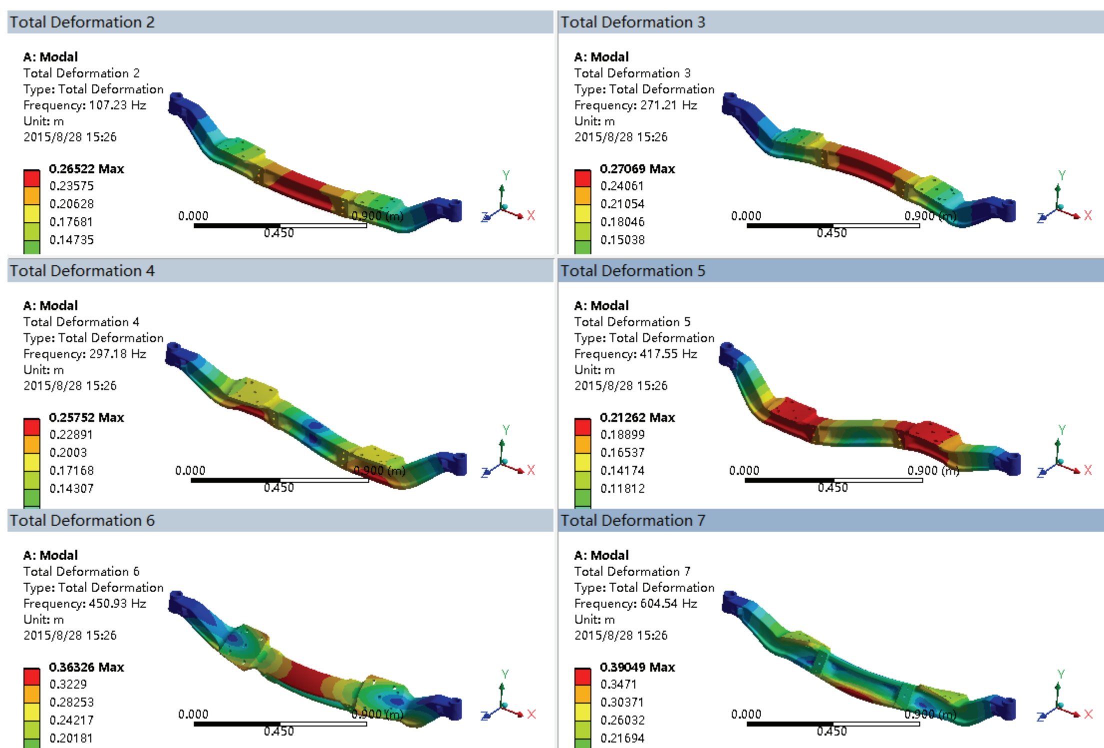


图 7-53　各阶模态变形云图

Step8： 单击☒按钮关闭 Mechanical 界面。

7.3.7 谐响应分析

Step1： 单击 Harmonic Response（B5）选项，此时可以进行谐响应分析的设定和求解。

Step2： 如图 7-54 所示，单击 Outlines（分析树）中的 Harmonic Response（B5）→ Analysis Settings 选项，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”面板的 Options 中进行如下更改。

在 Range Minimum 中输入 0Hz，在 Range Maximum 中输入 400Hz，在 Solution Interval 中输入 10。

注意： Range Maximum 中输入的最大值应该是模态计算出来的最大值（即第六阶自振频率）的 2/3，计算出的最大自振频率为 604.54，所以输入的谐响应最大频段应为 604.54/1.5=403.03，这里输入 400 即可。如果输入的频率大于自振频率值，将会出现如图 7-55 所示的警告提示。

Step3： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Harmonic Response（B5）选项，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项。

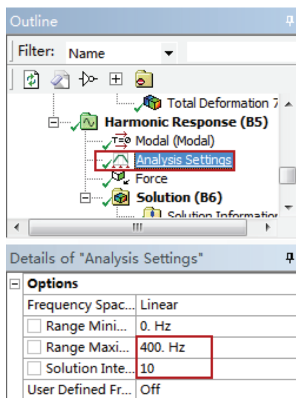


图 7-54 频率设定

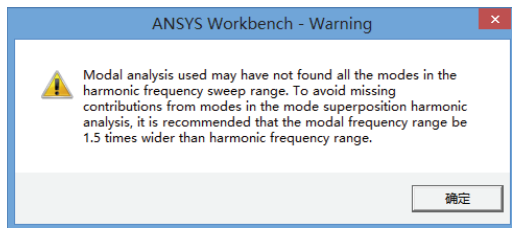


图 7-55 频率设定

Step4: 如图 7-56 所示，选中 Force 选项，在 Details of “Force” 面板的 Scope→Geometry 栏中选择中间两个面，在 Define By 栏中选择 Components 选项，在 Y Components 栏中输入-2000N，在 Phase Angle 栏中输入 0°，完成力的设置。

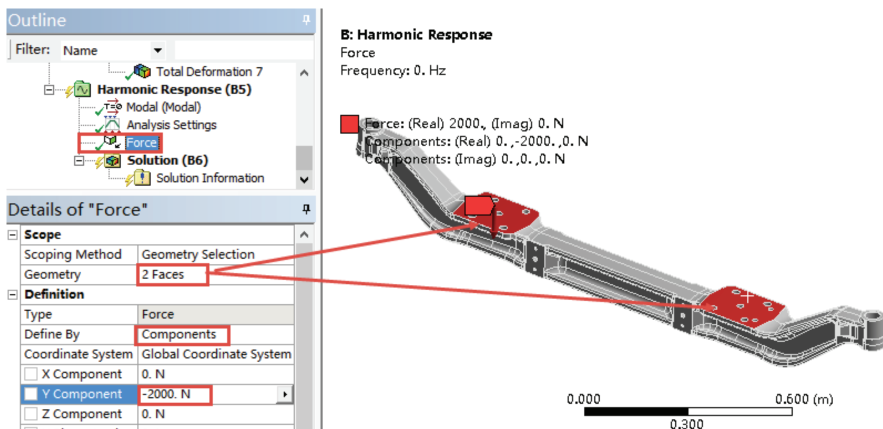


图 7-56 数值设定

7.3.8 谐响应计算

右键单击 Harmonic Response（B5）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

7.3.9 结果后处理

Step1: 在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Deformation→Total 命令，在后处理器中添加位移响应命令。

Step2: 图 7-57 所示为频率为 400Hz，相角为 0° 时的位移响应云图。

Step3: 在 Solution 工具栏中执行 Frequency Response→Deformation 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项，在变形选项卡中进行如下操作。

在 Geometry 栏中保证几何被选中。

在 Orientation 栏中选择 Y Axis 选项，其余默认即可。

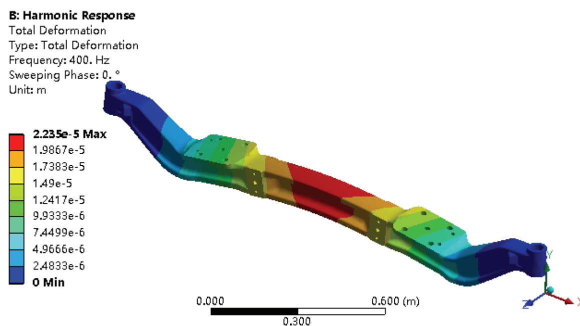


图 7-57　位移响应云图

Step4：右键单击 Solution 工具栏中的 Frequency Response 命令，在弹出来的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

Step5：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）→Frequency Response 选项，此时会出现图 7-58 所示的圆柱面随频率变化曲线。

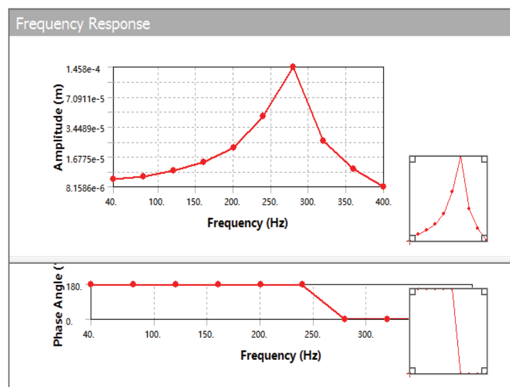
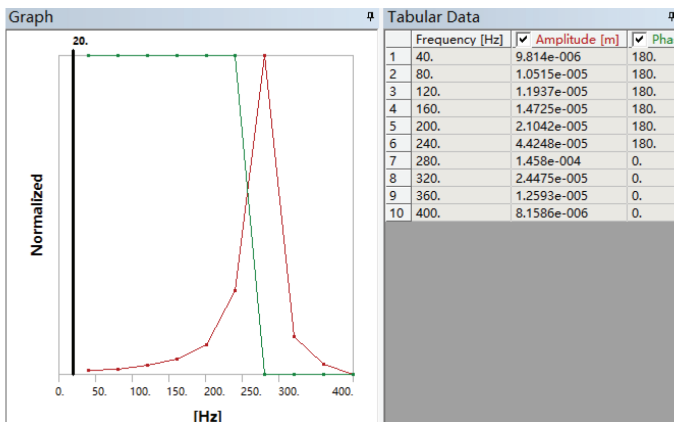


图 7-58　圆柱面随频率变化曲线

Step6：图 7-59 所示为单元各阶响应频率及相角。



	Frequency [Hz]	Amplitude [m]	Phas
1	40.	9.814e-006	180.
2	80.	1.0515e-005	180.
3	120.	1.1937e-005	180.
4	160.	1.4725e-005	180.
5	200.	2.1042e-005	180.
6	240.	4.4248e-005	180.
7	280.	1.458e-004	0.
8	320.	2.4475e-005	0.
9	360.	1.2593e-005	0.
10	400.	8.1586e-006	0.

图 7-59　单元各阶响应频率

Step7：在后处理中添加应力后处理选项，如图 7-60 所示为实体应力分布云图。

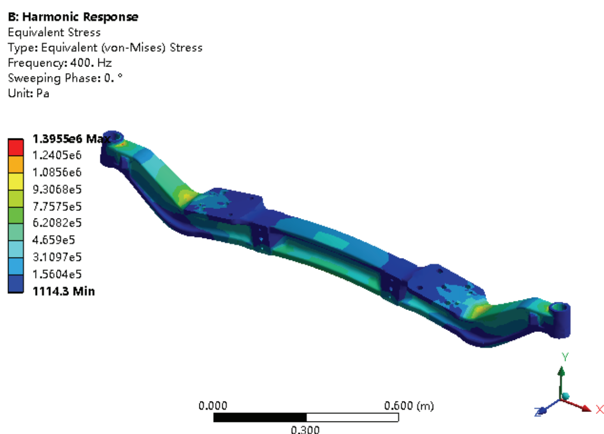


图 7-60　应力分布云图

Step8：在 Graph 窗口中的柱状图上任选一个频率下的竖条，单击鼠示右键，在弹出的图 7-61 所示的快捷菜单中选择 Retrieve This Results 选项。

注：本案例中选择的频次为 8 次，在柱状图上侧有显示。

Step9：经过程序自动计算后，得到图 7-62 所示的 8 次频率下应力分布云图。

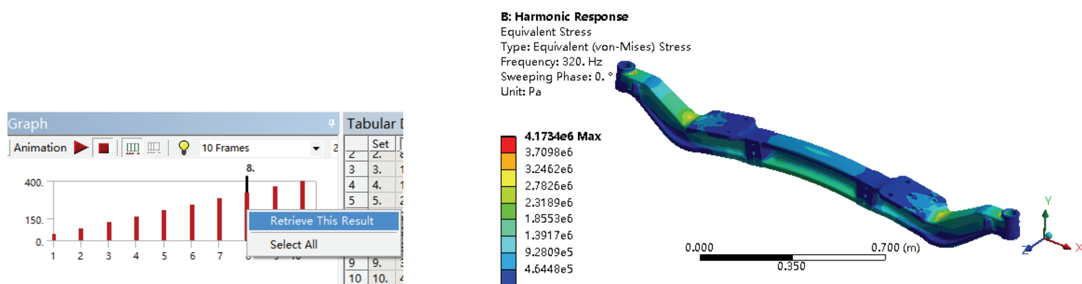


图 7-61　快捷菜单　　　　图 7-62　应力分布云图

7.3.10 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存为 Response 文件名。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

谐响应分析之前需要对结构进行模态分析，谐响应分析是需要读者引起重视的地方，常常容易忽略的地方是设置上限频率限值，此值应为模态分析时的最大模态频率值除以 1.5，即如果计算出来的最大模态频率值为 604.54Hz，则在谐响应分析时的最大上限频率值应为 604.54/1.5=403.03，如果输入的数值小于 403.03Hz，那么计算没有问题；如果输入的数值大

于 403.03Hz，则软件会有图 7-55 所示的提示，这表明输入的上限频率不是模态分析的最大频率除以 1.5。

7.4　谐响应分析实例 3——含阻尼谐响应分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的谐响应分析模块，对实体单元模型进行含阻尼的谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 谐响应分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter05\char07-3\ Response_Damp.wbpj

Step1：如图 7-63 所示，单击 Outlines（分析树）中的 Harmonic Response（B5）→ Analysis Settings 选项，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”面板的 Options 中进行如下更改。

Constant Damp 栏中输入 2.e-002。

Step2：重新计算。

Step3：图 7-64 所示为频率为 400Hz，相角为 0° 时的位移响应云图。

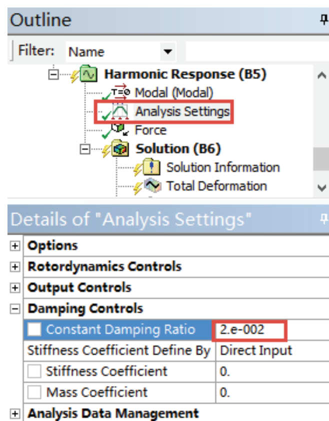


图 7-63　频率设定

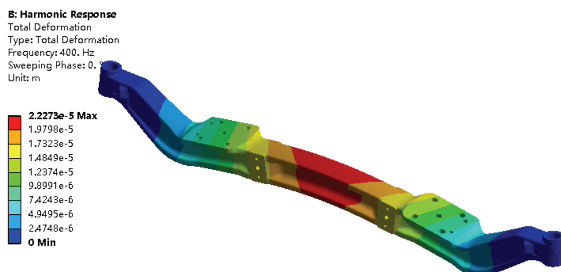


图 7-64　位移响应云图

Step4：在 Solution 工具栏中选择 Frequency Response→Deformation 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项，在变形选项卡中进行如下操作。

在 Geometry 栏中保证几何被选中。

在 Orientation 栏中选择 Y Axis 选项，其余默认即可。

Step5：右键单击 Solution 工具栏中的 Frequency Response 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）→Frequency Response 选项，此时会出现图 7-65 所示的圆柱面随频率变化曲线。

Step7：图 7-66 所示为单元各阶响应频率及相角。

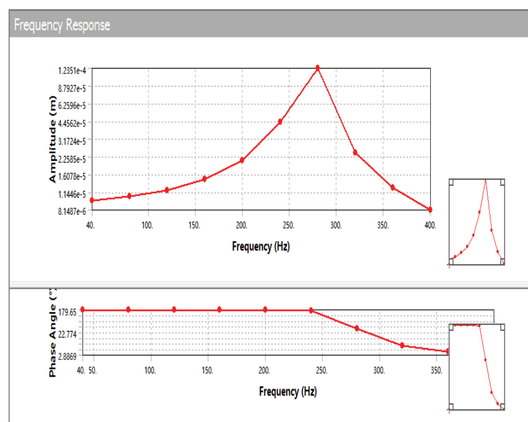
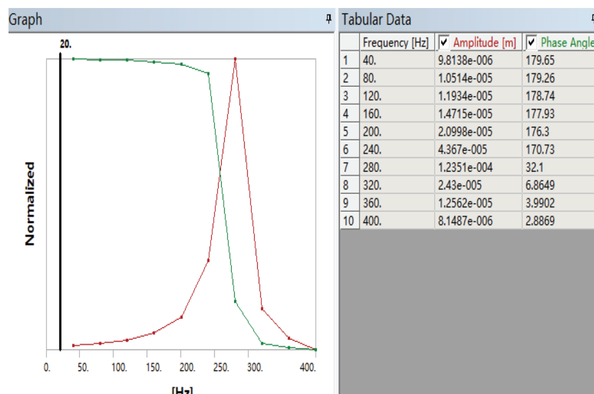


图 7-65　圆柱面随频率变化曲线



	Frequency [Hz]	Amplitude [m]	Phase Angle
1	40.	9.8138e-006	179.65
2	80.	1.0514e-005	179.26
3	120.	1.1934e-005	178.74
4	160.	1.4715e-005	177.93
5	200.	2.0998e-005	176.3
6	240.	4.367e-005	170.73
7	280.	1.2351e-004	32.1
8	320.	2.43e-005	6.8649
9	360.	1.2562e-005	3.9902
10	400.	8.1487e-006	2.8869

图 7-66　各阶响应频率

Step8： 在后处理中添加应力后处理选项，图 7-67 所示为实体应力分布云图。

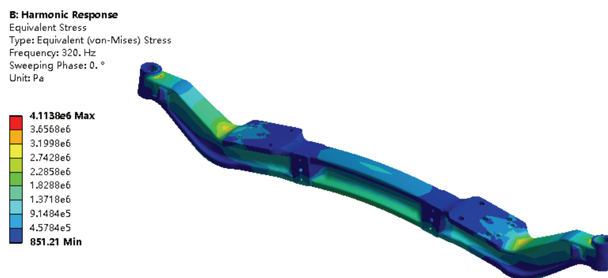


图 7-67　实体应力分布云图

7.5　本章小结

本章用了两个实例，对谐响应分析的操作方法进行了简单介绍，读者通过实例的学习，能够学会如何进行谐响应分析并正确判断共振的发生，从而对深入的避开共振的结构设计打下一定的基础。

第 8 章　响应谱分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的响应谱分析模块进行讲解，并通过典型应用对各种分析的一般步骤进行详细介绍，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

知识点 \ 学习目标	了解	理解	应用	实践
响应谱分析应用	√			
响应谱分析的意义		√	√	√
ANSYS Workbench 响应谱分析		√	√	√
ANSYS Workbench 响应谱分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 响应谱后处理			√	√

8.1　响应谱分析简介

响应谱分析是一种频域分析，其输入载荷为振动载荷的频谱，如地震响应谱，常用的频谱加速度频谱，也可以是速度频谱和位移频谱等。响应谱分析从频域的角度计算结构的峰值响应。

载荷频谱被定义为响应幅值与频率的关系曲线，响应谱分析计算结构各阶振型在给定的载荷频谱下的最大响应，这一最大响应是响应系数和振型的乘积，这些振型最大响应组合在一起就给出了结构的总体响应。因此响应谱分析需要首先计算结构的固有频率和振型，必须在模态分析之后进行。

响应谱分析的一个替代方法是瞬态分析，瞬态分析可以得到结构响应随时间的变化反应，当然也可以得到结构的峰值响应，瞬态分析结果更精确，但需要花费更多的时间。响应谱分析忽略了一些信息（如相位、时间历程等），但能够快速找到结构的最大响应，满足了很多动力设计的要求。

响应谱分析的应用非常广泛，最典型的应用是土木行业的地震响应谱分析，响应谱分析是地震分析的标准分析方法，被应用到各种结构的地震分析中，如核电站、大坝、建筑、桥梁等。任何受到地震或者其他振动载荷的结构或部件都可以用响应谱分析来进行校核。

8.1.1　频谱的定义

频谱是用来描述理想化振动系统在动力载荷激励作用下的响应的曲线，通常为位移或者

加速度响应，也称为响应谱。

频谱是许多单自由度系统在给定激励下响应最大值的包络线，响应谱分析的频谱数据包括频谱曲线和激励方向。

可以通过图 8-1 所示来进一步说明，考虑安装于振动台的 4 个单自由度弹簧质量系统，频率分别为 f_1、f_2、f_3、f_4，且有 $f_1 < f_2 < f_3 < f_4$。给振动台施加一种振动载荷激励，记录下每个单自由度系统的最大响应 u，可以得到 $u-f$ 关系曲线，如图 8-2 所示，此曲线就是给定激励的频谱（响应谱）曲线。

频率和周期具有倒数关系，频谱通常以响应值-周期的关系曲线的形式给出。

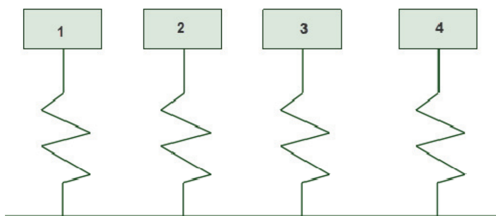


图 8-1　单自由度系统

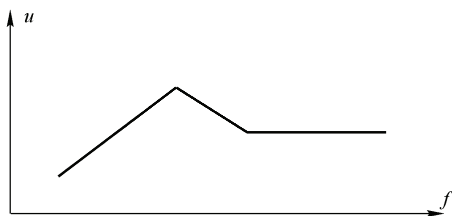


图 8-2　频谱曲线

8.1.2 响应谱分析的基本概念

响应谱分析首先要进行模态分析，模态分析提取主要被激活振型的频率和振型，模态提取的频率应该位于频谱曲线频率范围内。

为了保证计算能够考虑所有影响显著的振型，通常频谱曲线频率范围不应太小，应该一直延伸到谱值较小的区域，模态分析提取的频率也应该延伸到谱值较小的频率区（但仍然位于频谱曲线范围内）。

谱分析（除了响应谱分析以外，还有随机振动分析）涉及以下几个概念：参与系数、模态系数、模态有效质量、模态组合。程序内部计算这些系数或进行相应的操作，用户并不需要直接面对这些概念，但了解这些概念有助于更好地理解谱分析。

1．参与系数

参与系数用于衡量模态振型在激励方向上对变形的影响程度（进而影响应力），参与系数是振型和激励方向的函数，对于结构的每一阶模态 i，程序需要计算该模态在激励方向上的参与系数 γ_i。

参与系数的计算公式如下：

$$\gamma_i = \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{D} \tag{8-1}$$

其中，u_i 是第 i 阶模态按照 $\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{u} = 1$ 式归一化的振型位移向量，$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵，$\boldsymbol{D}$ 为描述激励方向的向量。

参与系数的物理意义很好理解，如图 8-3 所示的悬臂梁，若在 Y 方向施加激励，则模态 1 的参与系数最大，模态 2 的参与系数次之，模态 3 的参与系数为 0；若在 X 方向施加激励，则模态 1 和模态 2 的参与系数都为 0，模态 3 的参与系数反而最大。

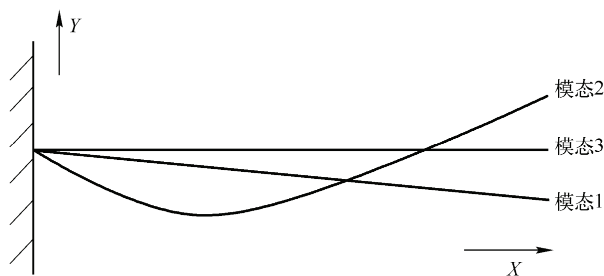


图 8-3　模态参与系数

2．模态系数

模态系数是与振型相乘的一个比例因子，从二者的乘积可以得到模态最大响应。

根据频谱类型的不同，模态系数的计算公式不同，模态 i 在位移频谱、速度频谱、加速度频谱下的模态系数 A_i 的计算公式分别如式（8-2）～式（8-4）所示。

$$A_i = S_{ui}\gamma_i \tag{8-2}$$

$$A_i = \frac{S_{vi}\gamma_i}{\omega_i} \tag{8-3}$$

$$A_i = \frac{S_{ai}\gamma_i}{\omega_i^2} \tag{8-4}$$

其中，S_{ui}, S_{vi}, S_{ai} 分别为第 i 阶模态频率对应的位移频谱、速度频谱、加速度频谱值；ω_i 为第 i 阶模态的圆频率；γ_i 为模态参与系数。

模态的最大位移响应可计算如下：

$$\boldsymbol{u}_{i\max} = A_i \boldsymbol{u}_i \tag{8-5}$$

3．模态有效质量

模态 i 的有效质量可计算如下：

$$M_{ei} = \frac{\gamma_i^2}{\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{u}_i} \tag{8-6}$$

由于模态位移满足质量归一化条件 $\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{u} = 1$，因此：$M_{ei} = \gamma_i^2$

4．模态组合

得到每个模态在给定频谱下的最大响应后，将这些响应以某种方式进行组合就可以得到总影响。

ANSYS Workbench 16.0 软件提供了 3 种模态组合方法：SRSS（平方根法）、CQC（完全平方组合法）、ROSE（倍和组合法），这 3 种组合方式的公式如式（8-7）～式（8-9）所示。

$$\boldsymbol{R} = \left(\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{R}_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8-7}$$

$$\boldsymbol{R} = \left(\left|\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} k\varepsilon_{ij} \boldsymbol{R}_i \boldsymbol{R}_j\right|\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8-8}$$

$$R = (\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} k\varepsilon_{ij} R_i R_j)^{\frac{1}{2}} \tag{8-9}$$

8.2 响应谱分析实例——简单梁响应谱分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的响应谱分析模块，计算简单梁单元的模型在给定加速度频谱下的响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 响应谱分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Chapter08\char08-1\simple_Beam.agdb
结果文件	网盘\Chapter08\char08-1\simple_Beam.wbpj

8.2.1 问题描述

如图 8-4 所示模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算梁单元在给定加速度频谱下的响应情况，加速度谱数据见表 8-1。

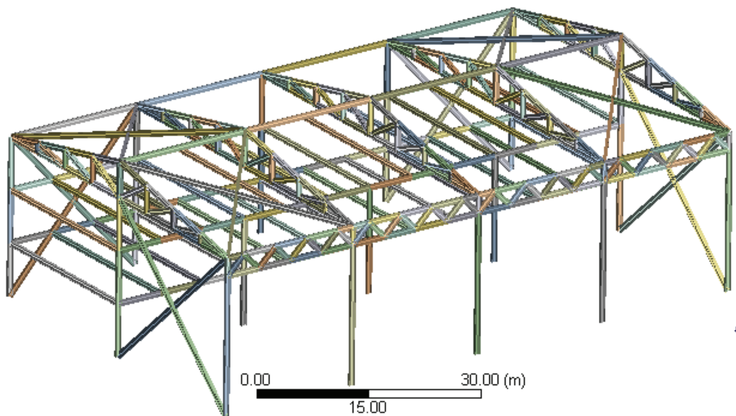


图 8-4 梁单元模型

表 8-1 加速度谱数据

自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值	自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值
0.10	0.002	1.00	0.070	8.67	0.200
0.11	0.003	1.11	0.088	10.00	0.165
0.13	0.003	1.25	0.105	11.11	0.153
0.14	0.005	1.43	0.110	12.50	0.140
0.17	0.006	1.67	0.130	14.29	0.131
0.20	0.006	2.00	0.150	18.67	0.121
0.25	0.010	2.50	0.200	19.00	0.111
0.33	0.021	3.33	0.255	25.00	0.100
0.50	0.032	4.00	0.265	50.00	0.100
0.67	0.047	5.00	0.255		

8.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：在工程管理窗口中建立图 8-5 所示的项目分析流程表。

注意：建立这样的流程表的目的是：先由静态力学分析添加重力加速度作为内部载荷，在模态分析中作为预应力分析，预应力分析的详细步骤参考第 4 章的相关内容，最后进行响应谱分析。

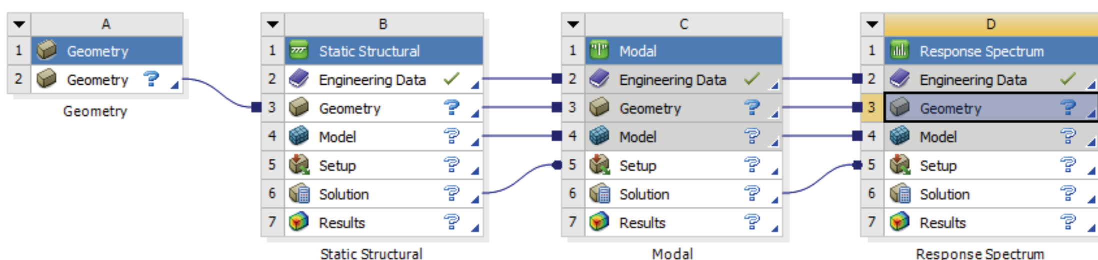


图 8-5 项目分析流程

8.2.3 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，在弹出的“打开”对话框中选择图 8-6 所示的几何文件。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 simple_Beam.agdb 几何体文件，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

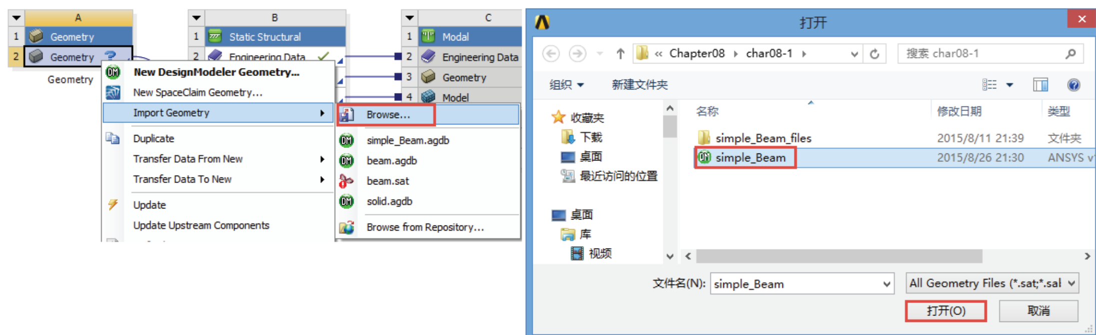


图 8-6 导入几何体

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入 DesignModeler 界面，在 DesignModeler 软件绘图区域会显示几何模型，如图 8-7 所示。

Step4：单击工具栏上的 按钮保存文件，此时弹出的“另存为”对话框，输入文件名为 simple_Beam.agdb，单击“保存”按钮。

Step5： 回到 DesignModeler 界面并单击右上角的 ✕（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

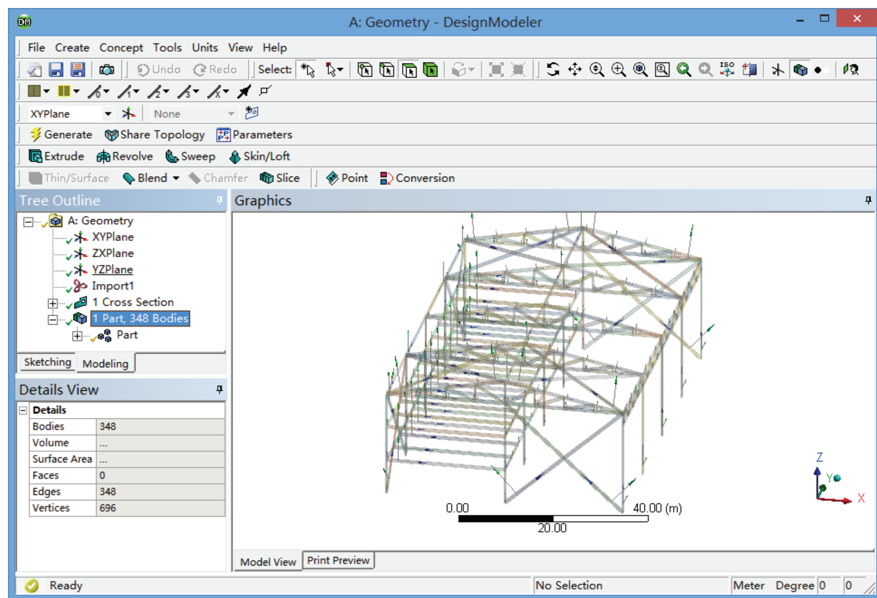


图 8-7　生成 DesignModeler 界面

8.2.4 静态力学分析

双击 B4 进入 Mechanical 分析平台，如图 8-8 所示，选择菜单 View→Cross Section Solids（Geometry）选项，显示几何模型。

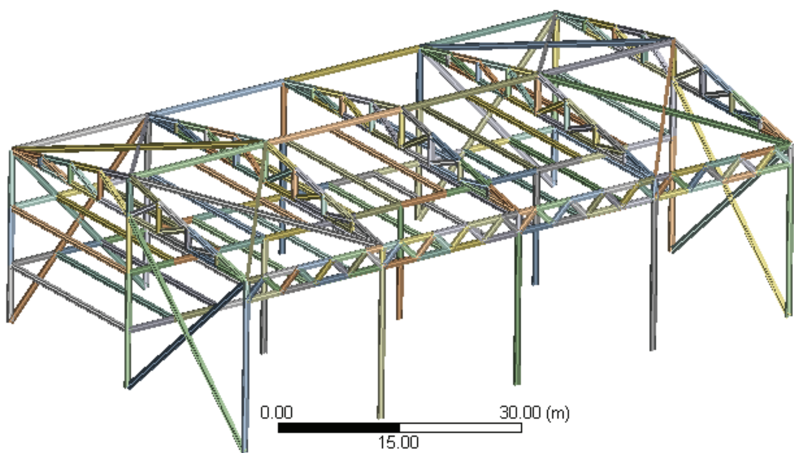


图 8-8　Mechanical 分析模型

8.2.5 添加材料库

本实例选择的材料为 Structural Steel（结构钢），此材料为 ANSYS Workbench 16.0 默认

被选中的材料，故不需要设置。

8.2.6 网格划分

Step1：选择 Mesh 命令，然后选择 Mesh 工具栏中的 Mesh Control→Sizing 命令，如图 8-9 所示。

Step2：选择 Mesh→Sizing 命令，此时弹出图 8-10 所示的 Sizing 对话框，在对话框中做如下操作。

在 Geometry 栏中保证所有几何被选中，此时 Geometry 栏中显示出选中几何的数量。

在 Type 栏中选择 Number of Division 选项。

在 Number of Division 选项中输入 5，将所有梁单元划分成 5 份。

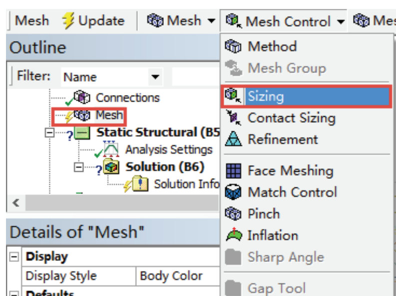


图 8-9 Mesh 命令

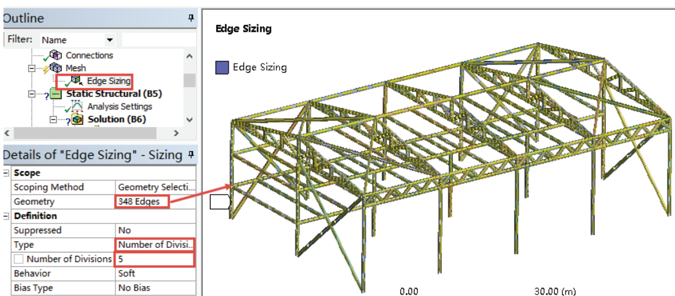


图 8-10 网格设置

Step3：右键单击 Mesh 选项，在弹出图 8-11 所示的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step4：划分完网格的几何模型如图 8-12 所示。

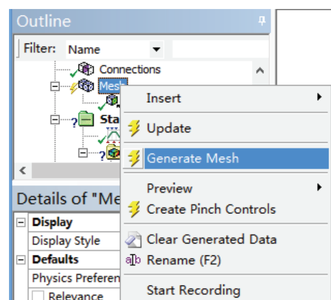


图 8-11 划分网格命令

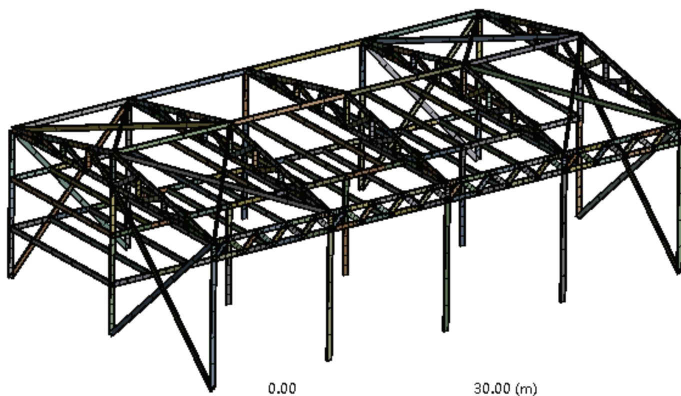


图 8-12 完成网格划分

8.2.7 施加约束

Step1：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令。

Step2：单击工具栏中的 （选择点）按钮，然后选择工具栏 按钮中的 ，使其变成

（框选择）按钮，选中 Fixed Support 选项，选择桥梁基础的下端 4 个节点，单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，此时在 Geometry 栏中显示图 8-13 所示的 15Vertices。

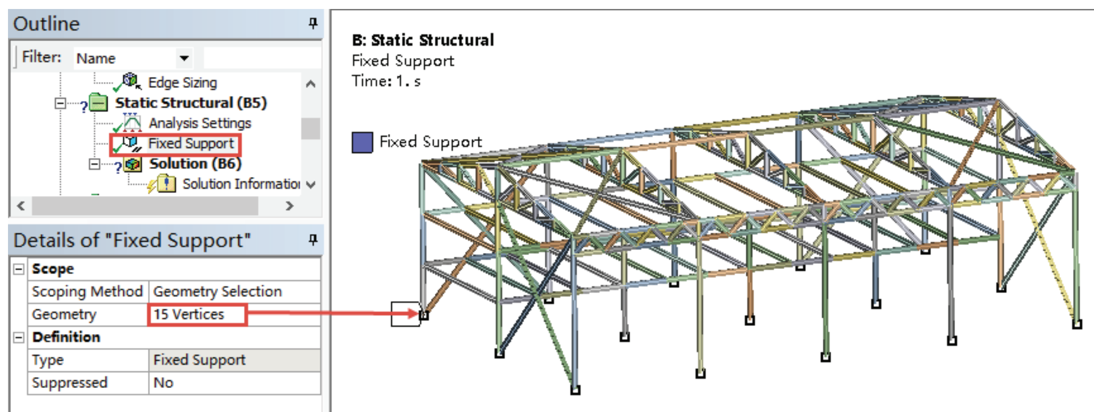


图 8-13 施加固定约束

Step3：选择 Environment 工具栏中的 Inertial（惯性）→Standard Earth Gravity（标准重力加速度效应）命令，添加图 8-14 所示的重力加速度效应。

注意：这里的重力加速度方向沿着 Z 轴负方向。

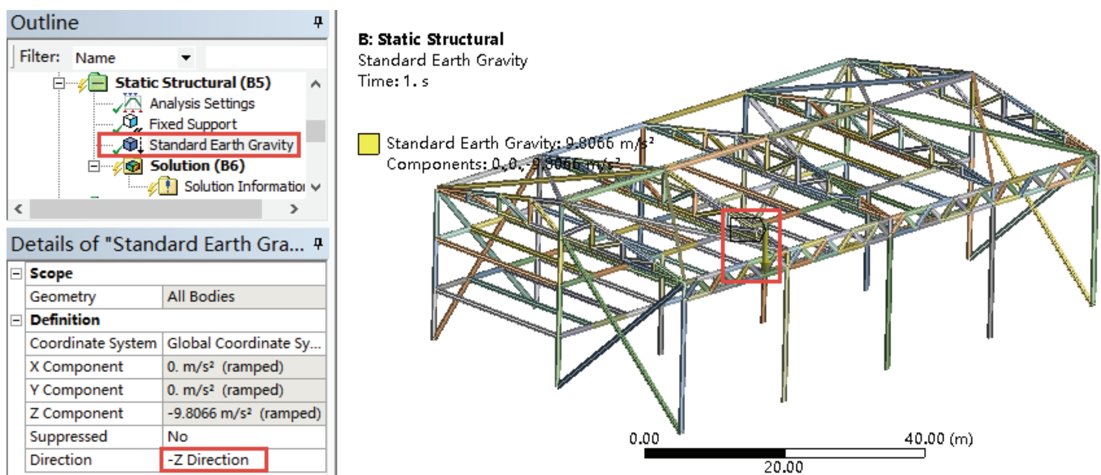


图 8-14 重力加速度效应

Step4：右键选择 Static Structural（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 进行计算。

Step5：右键选择 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 选项，此时位移云图如图 8-15 所示。

Step6：同样方式添加直接应力，此时应力云图如图 8-16 所示。

Step7：同样方式添加梁单元处理工具，此时梁单元应力云图如图 8-17 所示。



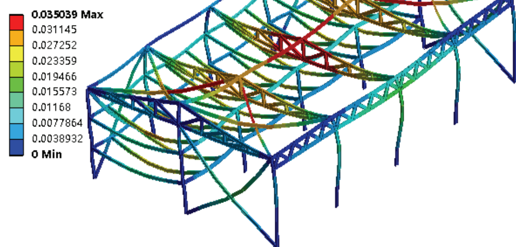


图 8-15　位移云图

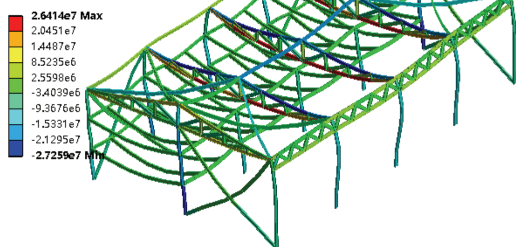


图 8-16　应力云图

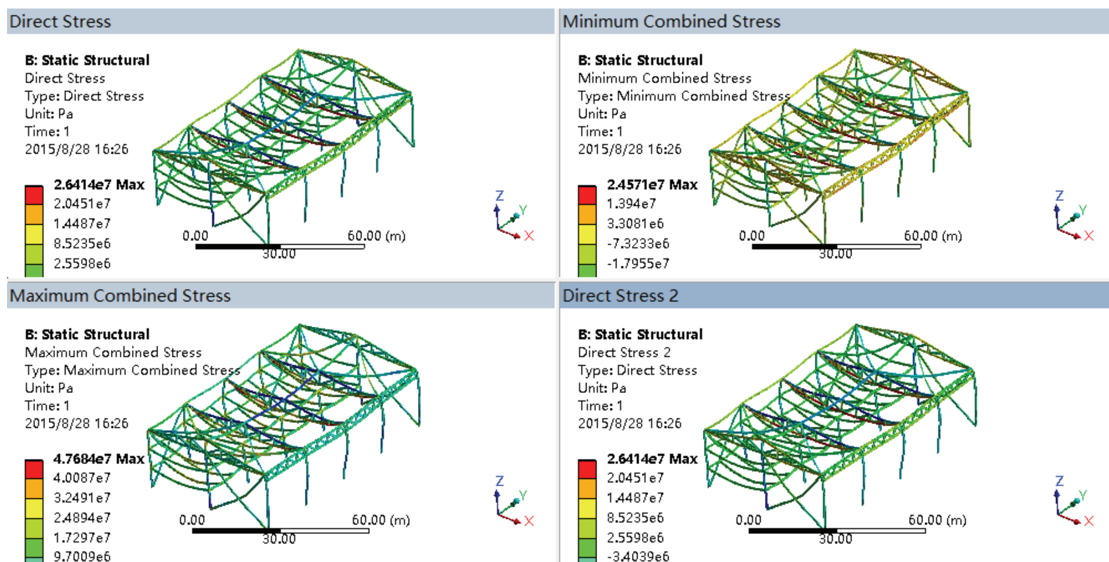


图 8-17　梁单元后处理云图

8.2.8 模态分析

右键单击 Modal（BC）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 选项，进行模态计算。

8.2.9 结果后处理

Step1： 选择 Solution→Deformation（变形）→Total 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step2： 在 Outlines（分析树）→Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令。

Step3： 选择 Outline（分析树）→Solution（B6）→Total Deformation（总变形）选项，此时会出现图 8-18 和图 8-19 所示的第一阶模态总变形及第二阶模态总变形分析云图。

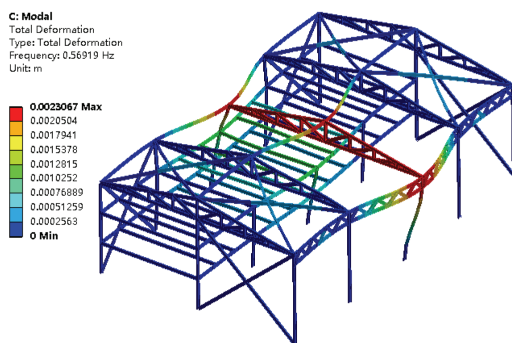


图 8-18 一阶变形云图

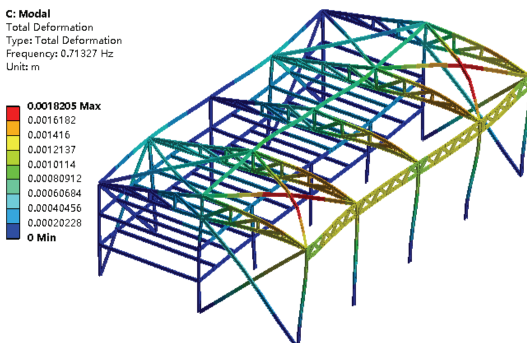


图 8-19 二阶变形云图

Step4： 单击工具栏中的图表，在下拉菜单中选择 Four Viewports 命令，此时在绘图窗口中同时出现 4 个窗口，在窗口中同时可以显示图 8-20 所示的三～六阶振型。

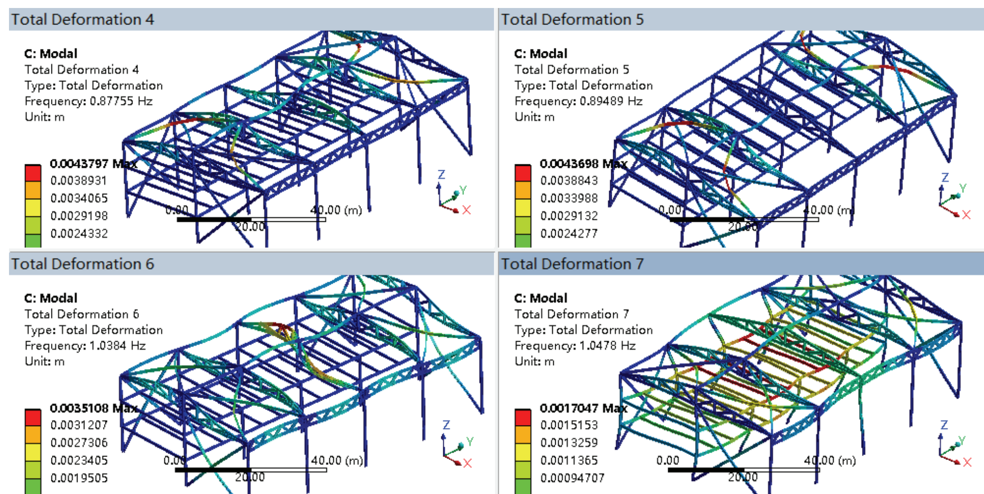
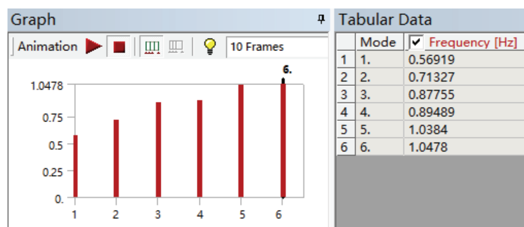


图 8-20 三～六阶变形云图

Step5： 图 8-21 所示为桥梁前六阶模态频率。

Step6： ANSYS Workbench 16.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）→ Modal（B5）→ Analysis Settings（分析设置选项）选项，在图 8-22 所示的 Details of "Analysis Settings" 下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	0.56919
2	2.	0.71327
3	3.	0.87755
4	4.	0.89489
5	5.	1.0384
6	6.	1.0478

图 8-21 各阶模态频率

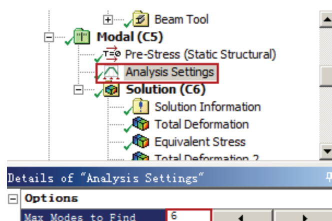


图 8-22 修改模态数量选项

8.2.10 响应谱分析

单击 Response Spectrum（D5）选项，进入响应谱分析项目中，此时会出现图 8-23 所示的 Environment 工具栏。

8.2.11 添加加速度谱

Step1：选择 Environment 工具栏中的 RS Base Excitation（基础激励响应分析）→RS Acceleration（加速度谱激励）命令，如图 8-24 所示，此时在分析树中会出现 RS Acceleration 选项。

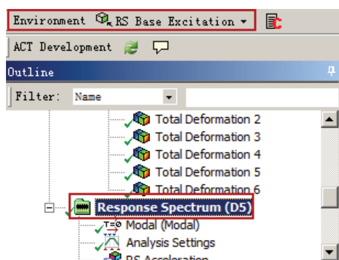


图 8-23 Environment 工具栏

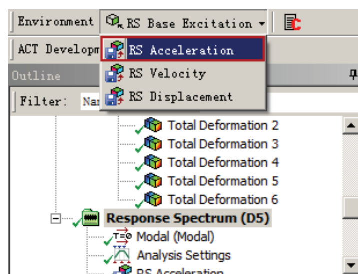
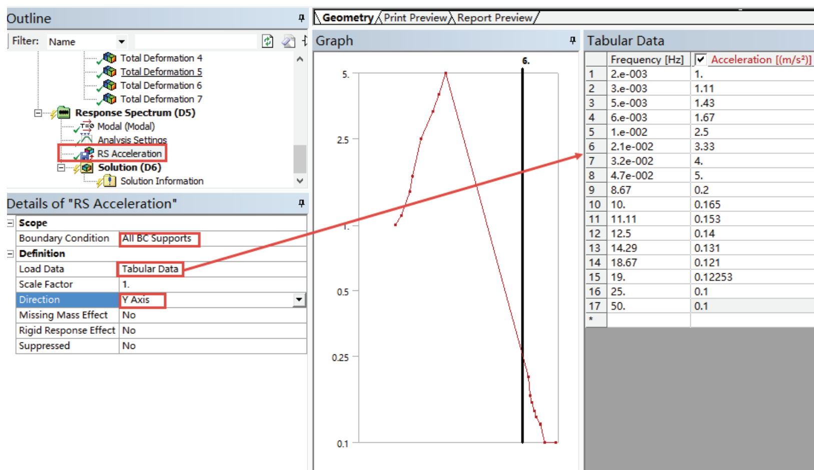


图 8-24 添加激励

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→ResponseSpectrum（D5）→RS Acceleration（加速度谱激励）选项，在下面出现的图 8-25 所示的 Details of“RS Acceleration”面板中进行如下更改。



	Frequency [Hz]	Acceleration [(m/s²)]
1	2.e-003	1.
2	3.e-003	1.11
3	5.e-003	1.43
4	6.e-003	1.67
5	1.e-002	2.5
6	2.1e-002	3.33
7	3.2e-002	4.
8	4.7e-002	5.
9	8.67	0.2
10	10.	0.165
11	11.11	0.153
12	12.5	0.14
13	14.29	0.131
14	18.67	0.121
15	19.	0.12253
16	25.	0.1
17	50.	0.1

图 8-25 RS Acceleration 面板

在 Scope→Boundary Condition 中选择 All BC Supports 选项。

在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中输入表 8-1 中数据。

在 Direction 栏中选择 Y Axis，其余默认即可。

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→ResponseSpectrum（D5）→RS Acceleration（加速度谱激励）选项，在下面出现的图 8-26 所示的 Details of “RS Acceleration” 面板中进行如下更改。

在 Scope→Boundary Condition 中选择 All BC Supports 选项。

在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中输入表 8-1 中数据。

在 Scale Factor 栏中输入 0.65。

在 Direction 栏中选择 Z Axis，其余默认即可。

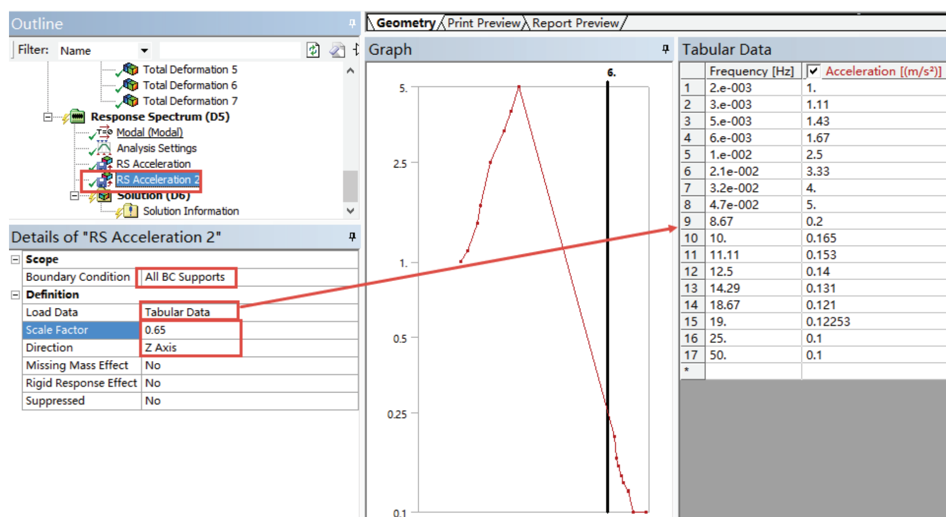


图 8-26　RS Acceleration 面板

Step4：鼠标右键单击 Outlines（分析树）→ResponseSpectrum（C5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

8.2.12 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（C6）选项，此时会出现图 8-27 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Directional 命令，如图 8-28 所示，此时在分析树中会出现 Directional Deformation 选项。

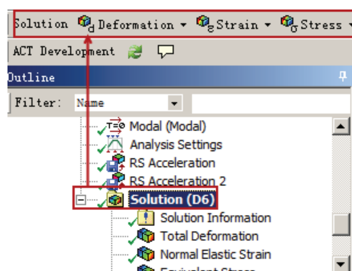


图 8-27　Solution 工具栏

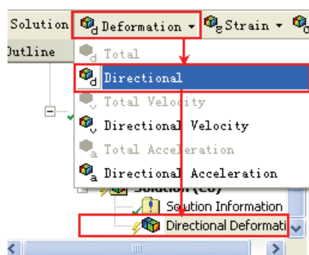


图 8-28　添加变形选项

Step3：鼠标右键单击 Outlines（分析树）→Solution（C6）选项，在弹出的快捷菜单中选择⚡Equivalent All Results 命令，如图 8-29 所示。

Step4：选择 Outline（分析树）→Solution（C6）→Directional Deformation 选项，此时会出现图 8-30 所示的变形分析云图。

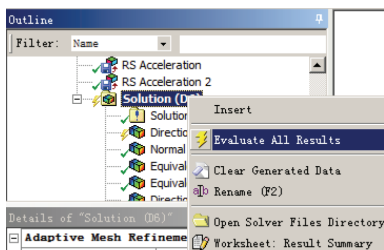


图 8-29　快捷菜单

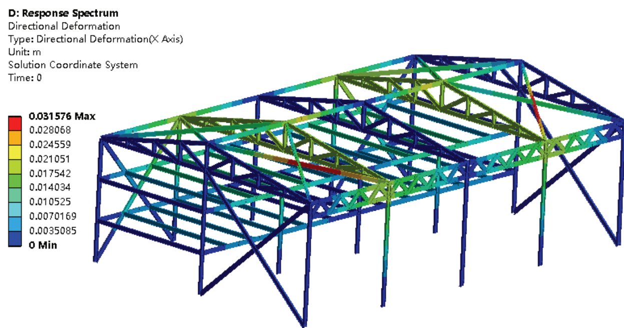
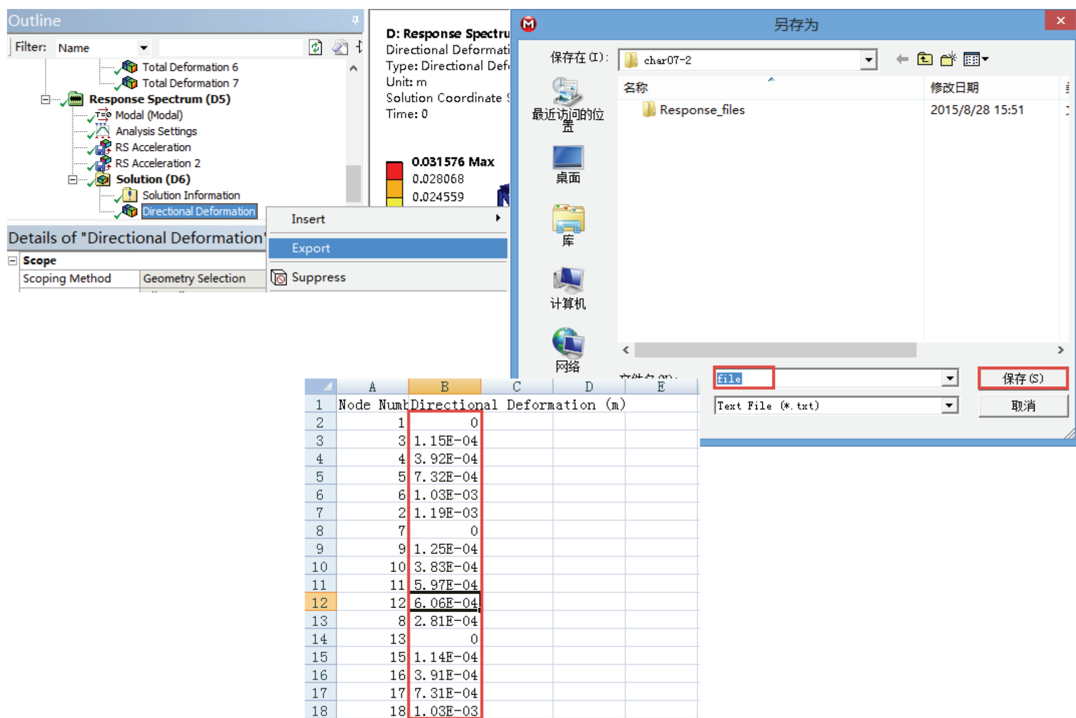


图 8-30　变形分析云图

Step5：右键选择 Directional Deformation 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Export 选项，在弹出的“另存为”对话框中单击“保存”按钮，此时将所有节点的变形数据结果保存成 file.txt 文本文档格式，并以默认的 Excel 打开，如图 8-31 所示。

注：节点数据导出可以对数据进行后处理，这里不再赘述。



	A	B
1	Node Num	Directional Deformation (m)
2	1	0
3	3	1.15E-04
4	4	3.92E-04
5	5	7.32E-04
6	6	1.03E-03
7	2	1.19E-03
8	7	0
9	9	1.25E-04
10	10	3.83E-04
11	11	5.97E-04
12	12	6.06E-04
13	8	2.81E-04
14	13	0
15	15	1.14E-04
16	16	3.91E-04
17	17	7.31E-04
18	18	1.03E-03

图 8-31　节点位移导出

8.2.13 其他设置

Step1：选择 Outline（模型树）→ Response Spectrum (C5) → Analysis Settings 命令，在出现的如图 8-32 所示的 Details of “Analysis Settings” 面板中进行模态组合类型选择，默认的为 SRSS，同时可以设定阻尼比。

Step2：在图 8-32 所示的组合类型中选择 CQC，设定阻尼比为 0.05，重新计算，得到 Z 方向变形云图，如图 8-33 所示。

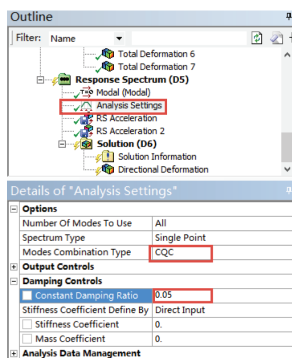


图 8-32 模态组合类型控制和阻尼比

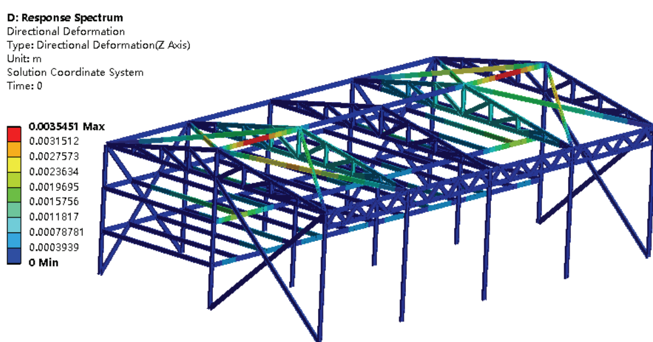


图 8-33 Z 方向变形云图

Step3：Y 方向变形及总变形如图 8-34 所示。

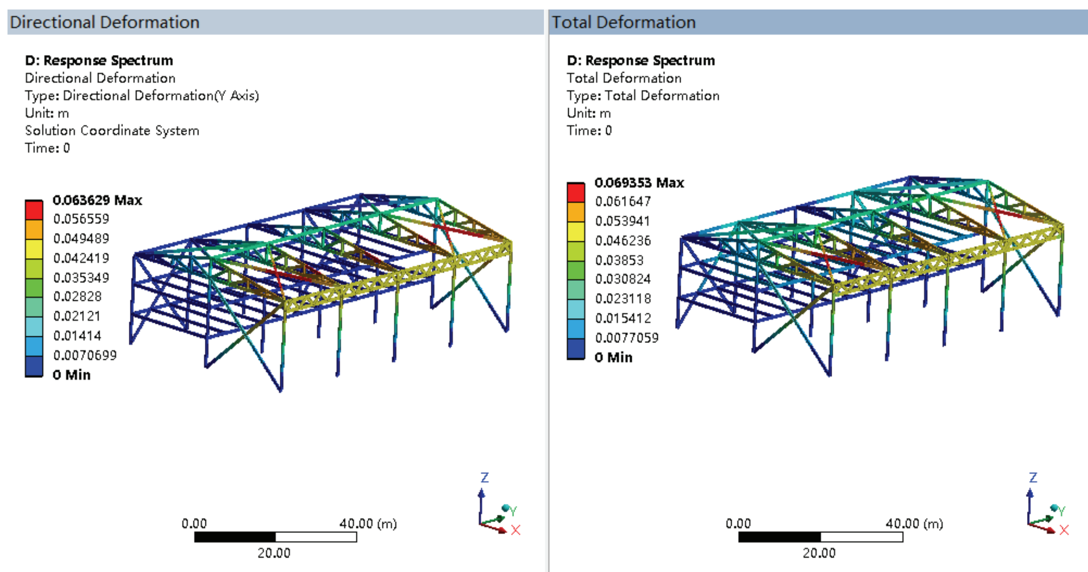


图 8-34 总变形云图

Step4：同样选择 ROSE 选项，设定阻尼比为 0.05，重新计算，得到 Z 方向变形云图如图 8-35 所示。

Step5： Y 方向变形及总变形如图 8-36 所示。

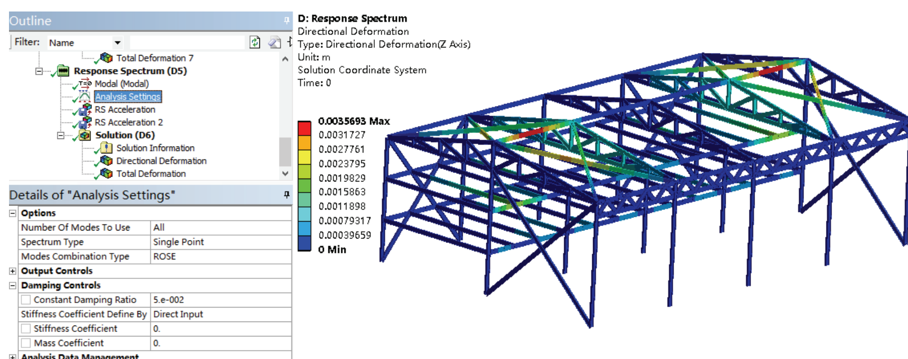


图 8-35　Z 方向变形云图

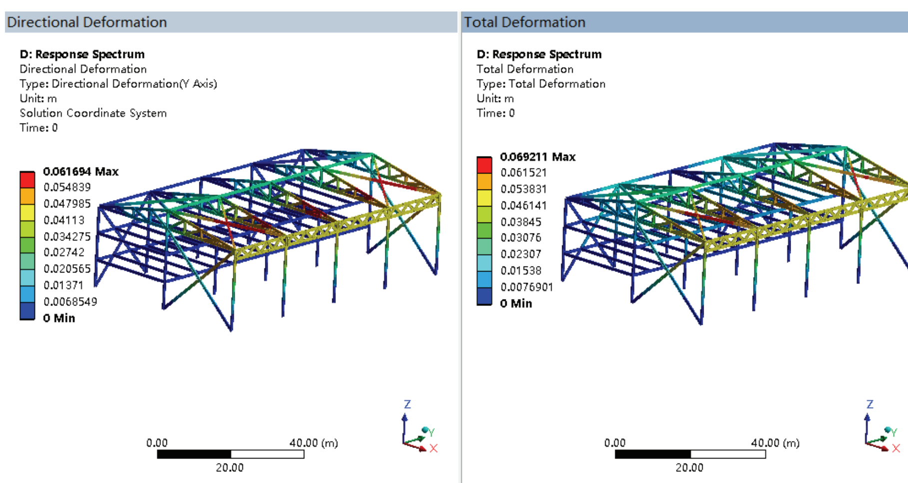


图 8-36　总变形云图

8.2.14　保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3： 单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

8.3　本章小结

本章通过一个简单的算例对响应谱分析进行详细讲解，响应谱适用于随时间或者随频率变化的载荷对物体的作用现象的分析，请读者参考帮助文档深入学习。

第 9 章　随机振动分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的随机振动分析模块进行讲解，并通过典型应用对各种分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
随机振动分析应用	√			
随机振动分析的意义		√	√	√
ANSYS Workbench 随机振动分析		√	√	√
ANSYS Workbench 随机振动分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 随机振动后处理			√	√

9.1　随机振动分析简介

随机振动分析也称为功率谱密度分析，是一种基于概率统计学理论的谱分析技术。现实中有很多情况下载荷是不确定的，如火箭每次发射会产生不同时间历程的振动载荷，汽车在路上行驶时每次的振动载荷也会有所不同。

由于时间历程的不确定性，这种情况不能选择瞬态分析进行模拟计算，于是从概率统计学角度出发，将时间历程的统计样本转变为功率谱密度函数（PSD）——随机载荷时间历程的统计响应，在功率谱密度函数的基础上进行随机振动分析，得到响应的概率统计值。随机振动分析是一种频域分析，需要首先进行模态分析。

功率谱密度函数（PSD）是随机变量自相关函数的频域描述，能够反映随机载荷的频率成分。设随机载荷历程为 $a(t)$，则其自相关函数可以表述为：

$$R(\tau)=\lim_{\tau\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^{\mathrm{T}}a(t)a(t+\tau)\mathrm{d}t \qquad (9\text{-}1)$$

当 τ =0 时，自相关函数等于随机载荷的均方值 $R(0)=E(a^2(t))$。

自相关函数是一个实偶函数，它在 $R(\tau)\sim\tau$ 图形上的频率反映了随机载荷的频率成分，而且具有如下性质：$\lim\limits_{\tau\to\infty}R(\tau)=0$，因此它符合傅里叶变换的条件：$\int_{-\infty}^{\infty}R(\tau)\mathrm{d}\tau<\infty$，可以进一步用傅里叶变换描述随机载荷的具体的频率成分：

$$R(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}F(f)\mathrm{e}^{2\pi f\tau}\mathrm{d}f \qquad (9\text{-}2)$$

其中，f 表示圆频率，$F(f)=\int_{-\infty}^{\infty}R(\tau)\mathrm{e}^{2\pi f\tau}\mathrm{d}\tau$ 称为 $R(\tau)$ 的傅里叶变换，也就是随机载荷 $a(t)$ 的功率谱密度函数，也称为 PSD 谱。

功率谱密度曲线为功率谱密度值 $F(f)$ 与频率 f 的关系曲线，f 通常被转化为 Hz 的形式给出。加速度 PSD 的单位是“加速度 ^{2}/Hz”，速度 PSD 的单位是“速度 ^{2}/Hz”，位移 PSD 的单位是“位移 ^{2}/Hz”。

如果 $\tau=0$，则可得到 $R(0)=\int_{-\infty}^{\infty}F(f)\mathrm{d}f=E(a^2(t))$，这就是功率谱密度的特性：功率谱密度曲线下面的面积等于随机载荷的均方值。

结构在随机载荷的作用下其响应也是随机的，随机振动分析的结果量的概论统计值，其输出结果为结果量（位移、应力等）的标准差，如果结果量符合正态分布，则这就是结果量的 1σ 值，即结果量位于 $-1\sigma\sim1\sigma$ 之间的概率为 68.3%，位于 $-2\sigma\sim2\sigma$ 之间的概率为 99.4%，位于 $-3\sigma\sim3\sigma$ 之间的概率为 99.7%。

进行随机振动分析首先要进行模态分析，在模态分析的基础上进行随机振动分析。

模态分析应该提取主要被激活振型的频率和振型，提取出来的频谱应该位于 PSD 曲线频率范围之内，为了保证计算考虑所有影响显著地振型，通常 PSD 曲线的频谱范围不要太小，应该一直延伸到谱值较小的区域，而且模态提取的频率也应该延伸到谱值较小的频率区（此较小的频率区仍然位于频谱曲线范围之内）。

在随机振动分析中，载荷为 PSD 谱，作用在基础上，也就是作用在所有约束位置。

9.2 随机振动分析实例——简单梁随机振动分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的随机振动分析模块，计算简单梁单元的模型在给定加速度频谱下的振动分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 随机振动分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Chapter09\char09-1\simple_Beam.agdb
结果文件	网盘\Chapter09\char09-1\simple_Beam_Random.wbpj

9.2.1 问题描述

如图 9-1 所示模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算梁单元在给定加速度频谱下的随机振动情况，加速度谱数据见表 9-1。

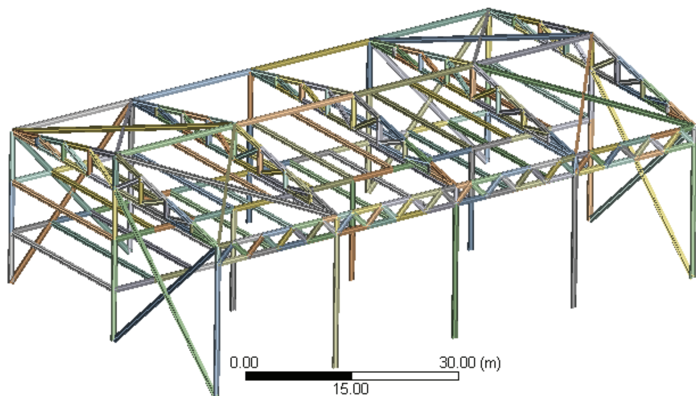


图 9-1　梁单元模型

表 9-1　加速度谱数据

自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值	自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值
0.10	0.002	1.00	0.070	8.67	0.200
0.11	0.003	1.11	0.088	10.00	0.165
0.13	0.003	1.25	0.25	0.010	2.50
0.14	0.005	1.43	0.33	0.021	3.33
0.17	0.006	1.67	0.50	0.032	4.00
0.20	0.006	2.00	0.67	0.047	5.00
0.105	11.11	0.153	0.200	19.00	0.111
0.110	12.50	0.140	0.255	25.00	0.100
0.130	14.29	0.131	0.265	50.00	0.100
0.150	18.67	0.121	0.255		

9.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：在工程管理窗口中建立图 9-2 所示的项目分析流程表。

注意：建立这样的流程表的目的是：先由静态力学分析添加重力加速度作为内部载荷，在模态分析中作为预应力分析，预应力分析的详细步骤参考第 4 章的相关内容，最后进行随机振动分析。

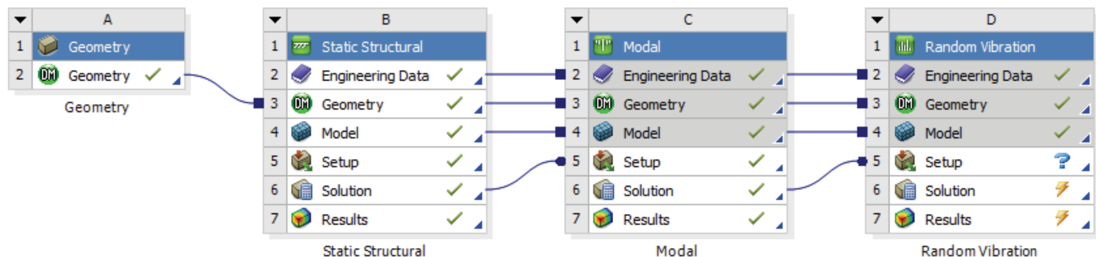


图 9-2　创建分析流程

9.2.3 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，在弹出的“打开”对话框中选择图 9-3 所示的几何体文件。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 simple_Beam.agdb 几何体文件，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

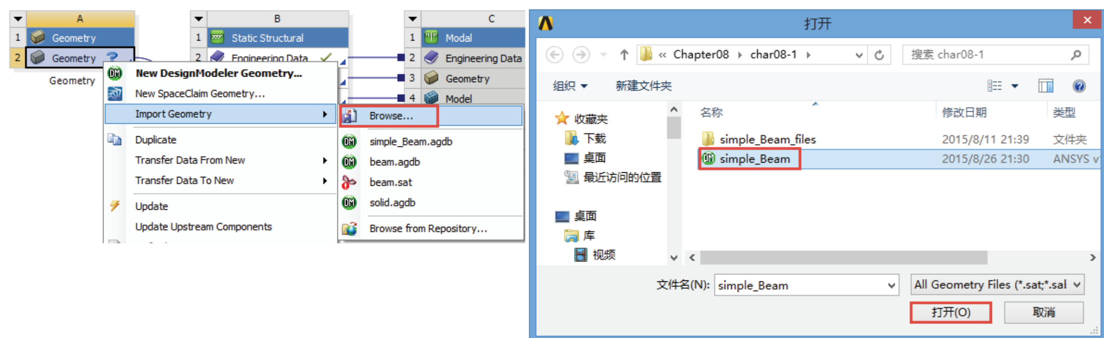


图 9-3　导入几何体

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，在 DesignModeler 软件绘图区域会显示几何模型，如图 9-4 所示。

Step4：单击工具栏上的按钮保存文件，此时弹出“另存为”对话框，输入文件名为 simple_Beam.agdb，单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面并单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

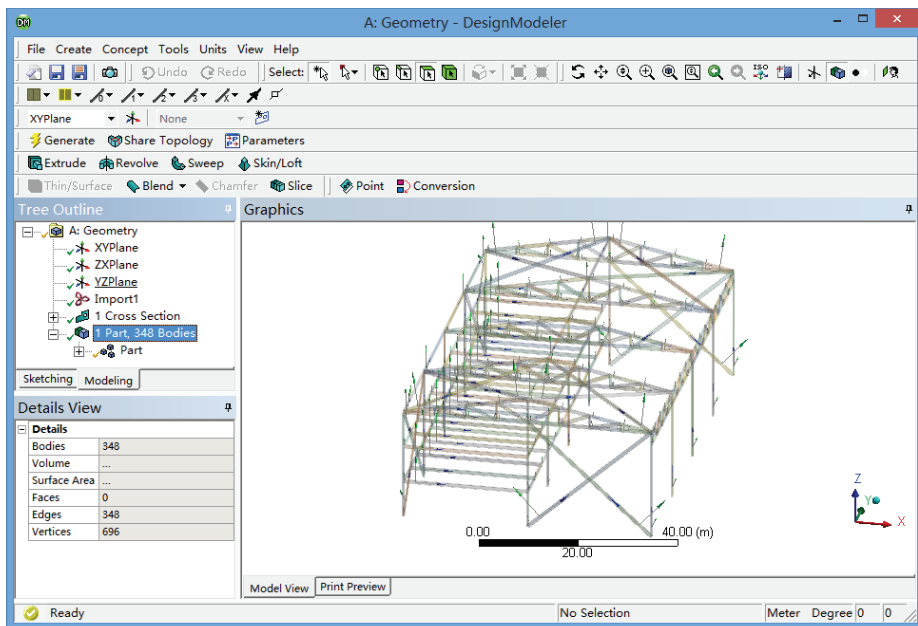


图 9-4　生成 DesignModeler 界面

9.2.4 静态力学分析

双击 B4 进入 Mechanical 分析平台，如图 9-5 所示，选择菜单栏 View→Cross Section Solids（Geometry）选项，显示几何模型。

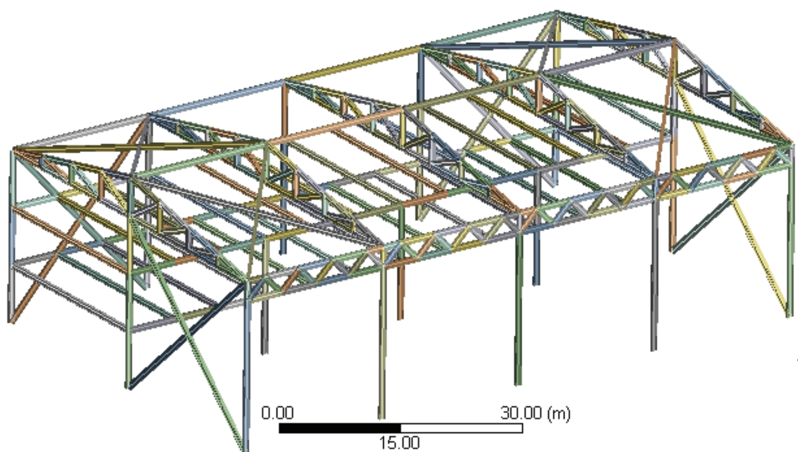


图 9-5　Mechanical 分析模型

9.2.5 添加材料库

本实例选择的材料为 Structural Steel（结构钢），此材料为 ANSYS Workbench 16.0 默认被选中的材料，故不需要设置。

9.2.6 网格划分

Step1： 选择 Mesh 命令，然后选择 Mesh 工具栏中的 Mesh Control→Sizing 命令，如图 9-6 所示。

Step2： 选择 Mesh 下面的 Sizing 命令，此时弹出图 9-7 所示的 Details of “Edge-Sizing”设置面板，在面板中进行如下操作。

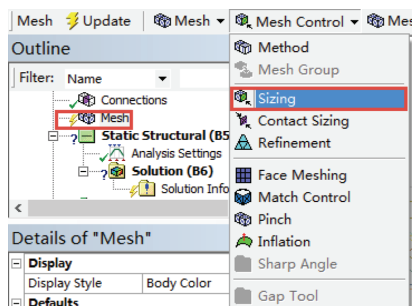


图 9-6　Mesh 命令

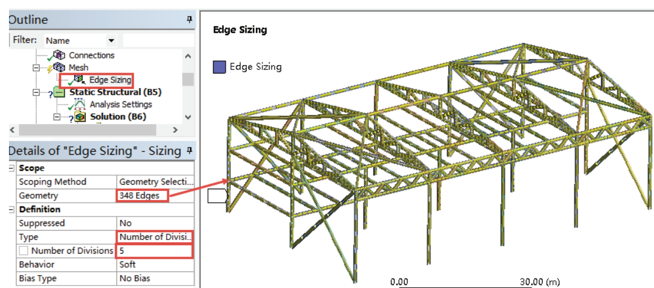


图 9-7　网格设置

在 Geometry 栏中保证所有几何被选中，此时 Geometry 栏中显示出选中几何的数量。

在 Type 栏中选择 Number of Division 选项。

在 Number of Division 选项中输入 5，将所有梁单元划分成 5 份。

Step3： 右键单击 Mesh 选项，在弹出图 9-8 所示的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step4： 划分完网格的几何模型如图 9-9 所示。

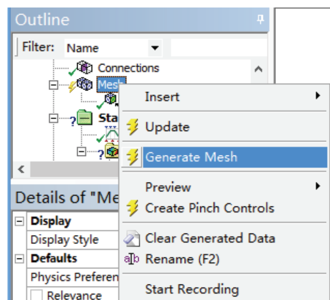


图 9-8　划分网格命令

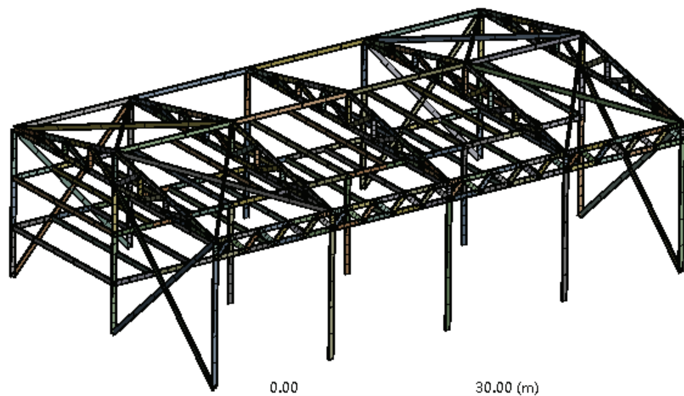


图 9-9　完成网格划分的模型

9.2.7 施加约束

Step1：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令。

Step2：单击工具栏中的（选择点）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选中 Fixed Support 选项，选择桥梁基础的下端 4 个节点，单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，此时在 Geometry 栏中显示图 9-10 所示的 15 Vertices。

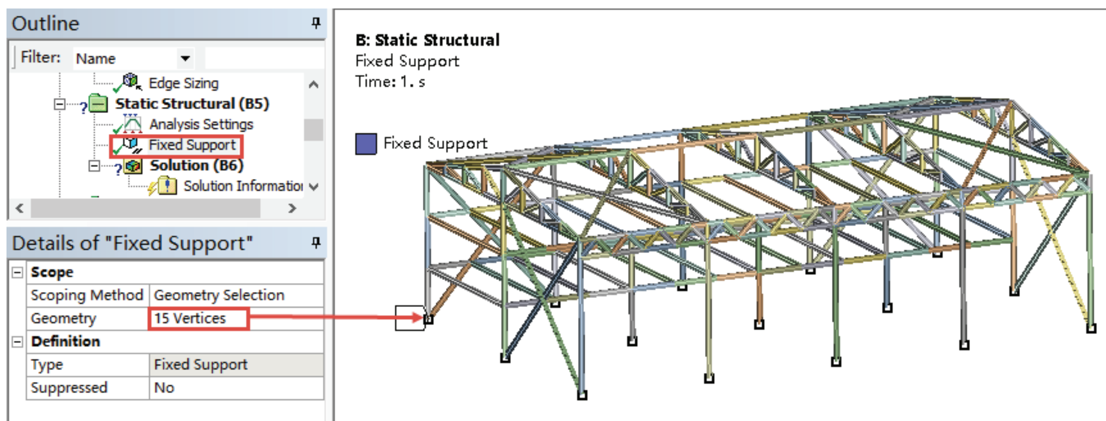


图 9-10　施加固定约束

Step3：选择 Environment 工具栏中的 Inertial（惯性）→Standard Earth Gravity（标准重力加速度效应）命令，添加图 9-11 所示的重力加速度效应。

注意：这里的重力加速度方向沿着 Z 轴负方向。

Step4：右键选择 Static Structural (A5)选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 选项进行计算。

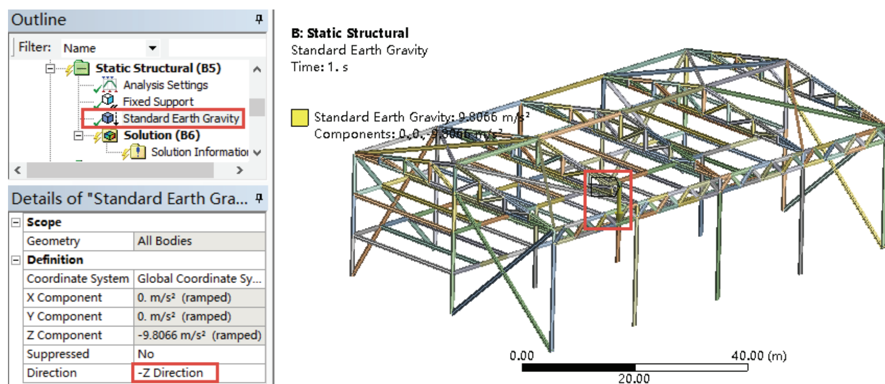


图 9-11 重力加速度效应

Step5: 右键选择 Solution（A6）选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 选项，此时位移云图如图 9-12 所示。

Step6: 同样方式添加直接应力，此时应力云图如图 9-13 所示。

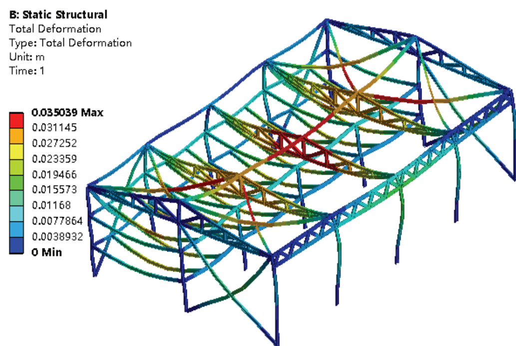


图 9-12 位移云图

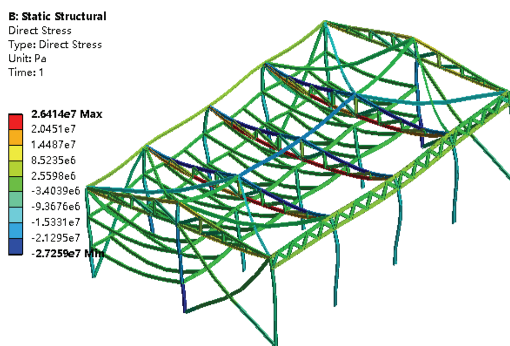


图 9-13 应力云图

Step7: 同样方式添加梁单元处理工具，此时梁单元应力云图如图 9-14 所示。

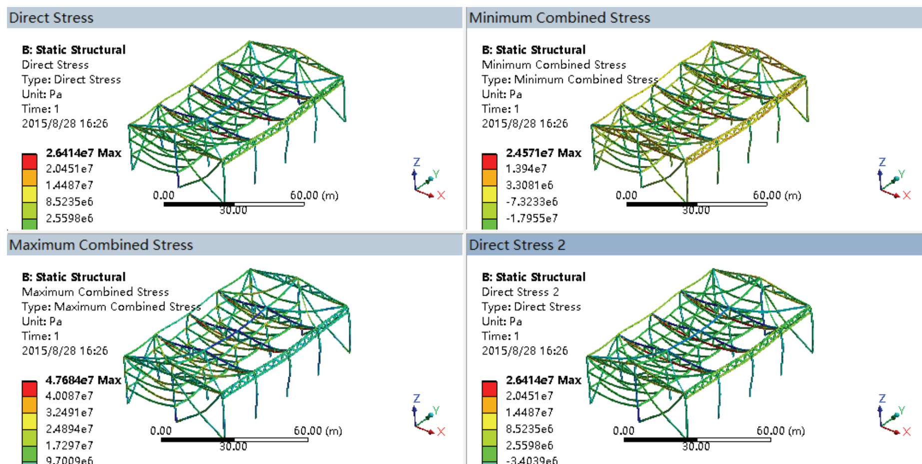


图 9-14 梁单元后处理云图

9.2.8 模态分析

右键单击 Modal（BC）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 选项，进行模态计算。

9.2.9 结果后处理

Step1：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令。

Step3：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）→Total Deformation（总变形）选项，此时会出现图 9-15 和图 9-16 所示的第一阶模态总变形及第二阶模态总变形分析云图。

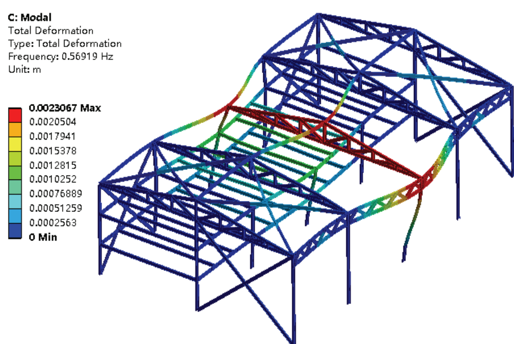


图 9-15　一阶总变形分析云图

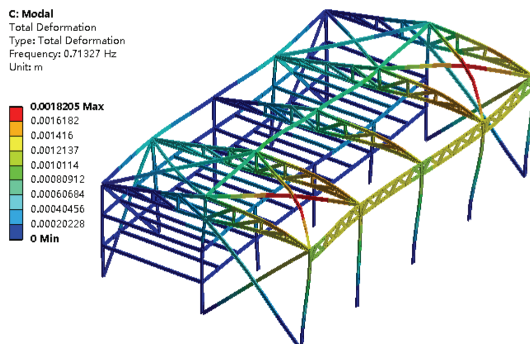


图 9-16　二阶总变形分析云图

Step4：单击工具栏中的图表，在下拉菜单中选择 Four Viewports 命令，此时在绘图窗口中同时出现四个窗口，在窗口中同时可以显示图 9-17 所示的三～六阶振型。

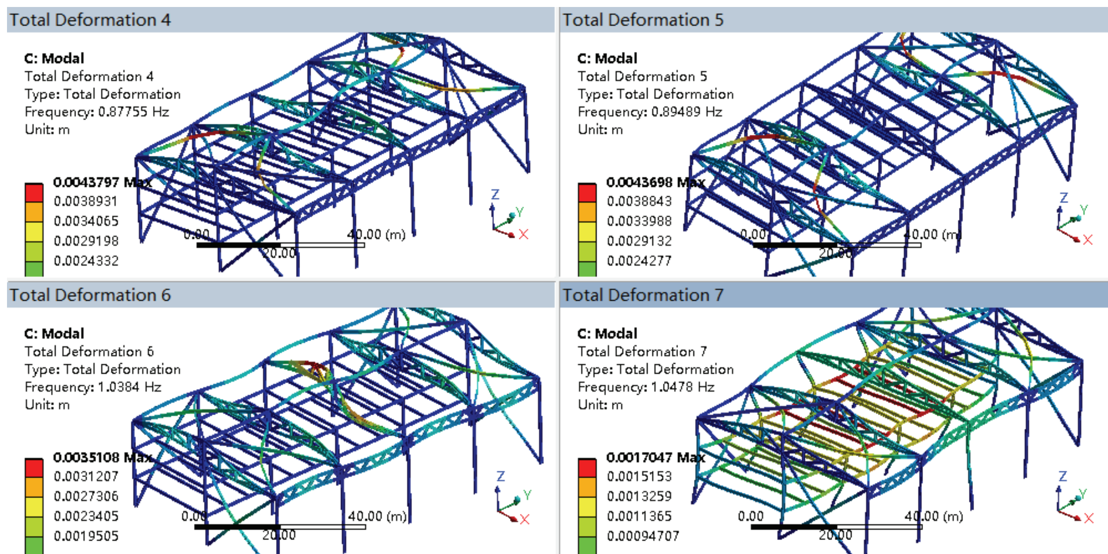


图 9-17　三～六阶变形

Step5：图 9-18 所示为桥梁前六阶模态频率。

Step6：ANSYS Workbench 16.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）→Modal（B5）→Analysis Settings（分析设置）选项，在图 9-19 所示的 Details of“Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

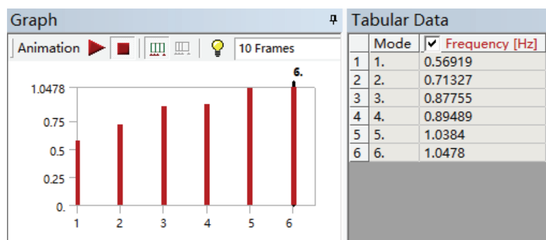


图 9-18　各阶模态频率

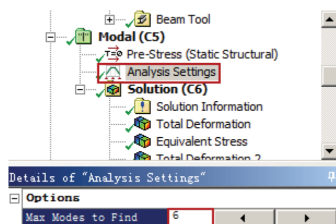


图 9-19　修改模态数量选项

9.2.10　随机振动分析

单击 Random Vibration（D5）选项，进入到随机振动分析项目中，此时会出现图 9-20 所示的 Environment 工具栏。

9.2.11　添加加速度谱

Step1：选择 Environment 工具栏中的 PSD Base Excitation（基础激励响应分析）→PSD Acceleration（加速度谱激励）命令，如图 9-21 所示，此时在分析树中会出现 PSD Acceleration 选项。

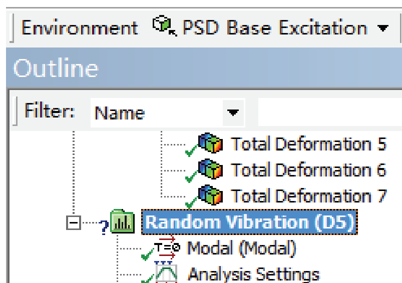


图 9-20　Environment 工具栏

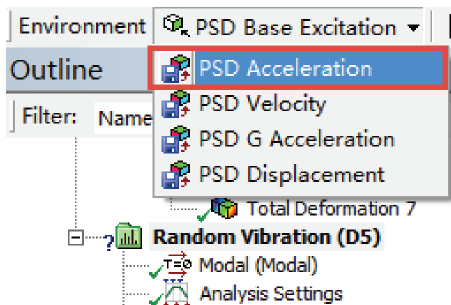


图 9-21　添加激励

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Random Vibration（D5）→PSD Acceleration（加速度谱激励）选项，在图 9-22 所示的 Details of“PSD Acceleration”面板中进行如下更改。

在 Scope→Boundary Condition 中选择“All Fixed Supports”选项。

在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中输入表 9-1 中数据。

在 Direction 栏中选择 Y Axis，其余默认即可。

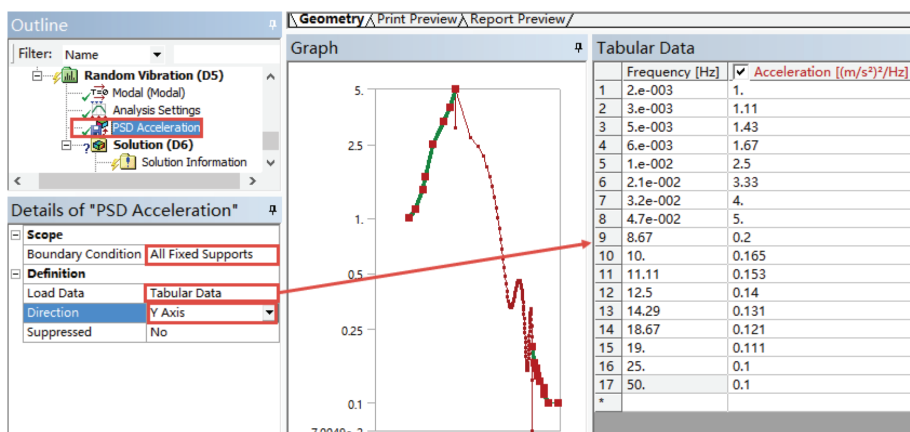


图 9-22　PSD Acceleration 面板 1

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Random Vibration (D5)→PSD Acceleration（加速度谱激励）选项，在图 9-23 所示的 Details of“PSD Acceleration”面板中进行如下更改：

在 Scope→Boundary Condition 中选择“All Fixed Supports”选项。

在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中输入表 9-1 中数据。

在 Direction 栏中选择 Z Axis，其余默认即可。

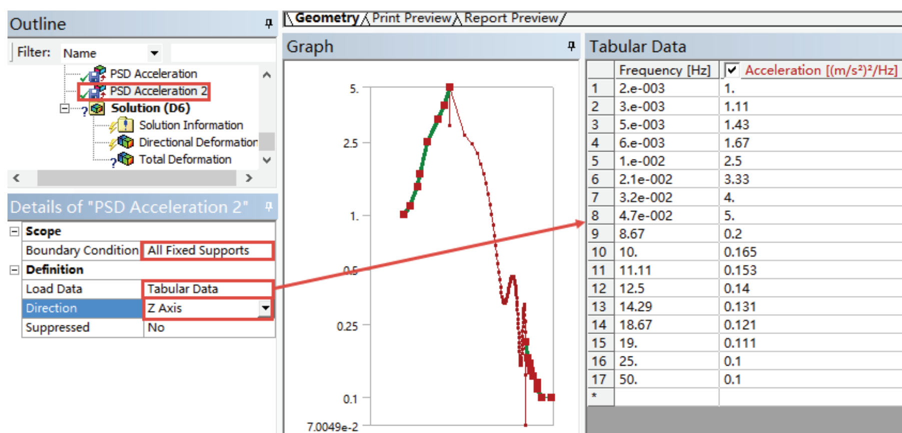


图 9-23　PSD Acceleration 面板 2

Step4：在 Outlines（分析树）中的 Random Vibration（D5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

9.2.12 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（C6）选项，此时会出现图 9-24 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Directional 命令，如图 9-25 所

示，此时在分析树中会出现 Directional Deformation 选项。

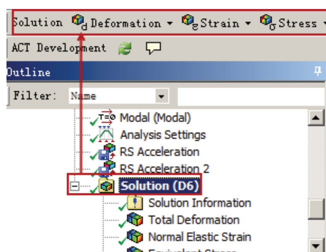


图 9-24 Solution 工具栏

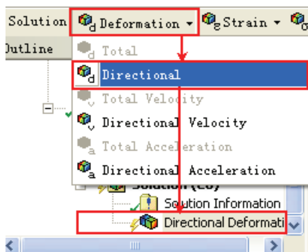


图 9-25 添加变形选项

Step3： 在 Outlines（分析树）→Solution（C6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 9-26 所示。

Step4： 选择 Outline（分析树）→Solution（C6）→Directional Deformation 选项，此时会出现图 9-27 所示的变形分析云图。

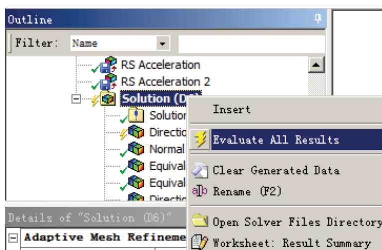


图 9-26 快捷菜单

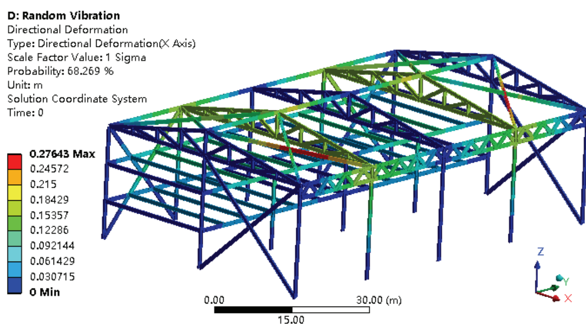


图 9-27 变形分析云图

Step5： 右键选择 Directional Deformation 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Export 选项，在弹出的"另存为"对话框中单击"保存"按钮，此时将所有节点的变形数据结果保存成 file.txt 文本文档格式，并以默认的 Excel 打开，如图 9-28 所示。

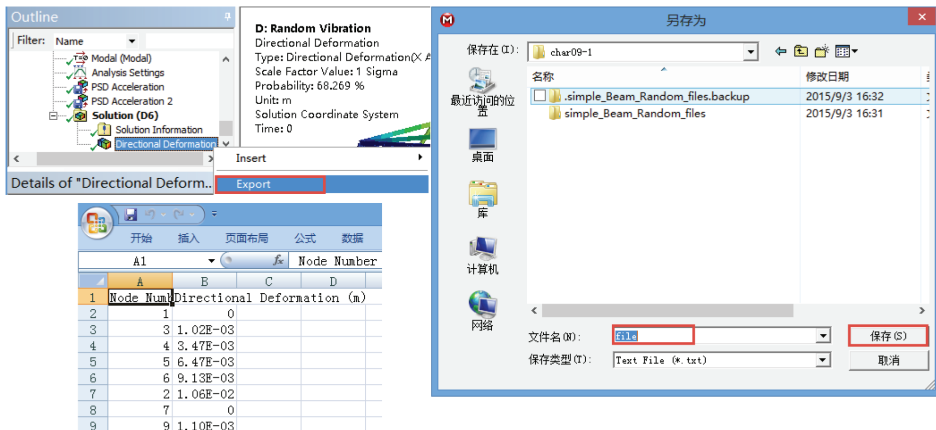


图 9-28 节点位移导出

注：节点数据导出可以对数据进行后处理，这里不再赘述。

9.2.13 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3：单击右上角的☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

9.3 本章小结

本章通过一个简单的算例对随机振动分析进行详细地讲解，随机振动适用于随时间或者随频率变化的载荷对物体的作用现象的分析，请读者参考帮助文档深入学习。

第 10 章　瞬态动力学分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的瞬态动力学分析模块进行讲解，并通过典型案例对各种分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
瞬态动力学分析应用	√			
瞬态动力学分析的意义		√	√	√
ANSYS Workbench 瞬态动力学分析		√	√	√
ANSYS Workbench 瞬态动力学分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 瞬态动力学后处理			√	√

10.1　瞬态动力学分析简介

10.1.1 瞬态动力学分析简介

瞬态动力学分析是时域分析，是分析结构在随时间任意变化的载荷作用下，动力响应过程的技术。其输入数据是作为时间函数的载荷，而输出数据是随时间变化的位移或其他输出量，如应力应变等。

瞬态动力学分析具有广泛的应用。对于承受各种冲击载荷的结构，如汽车的门、缓冲器、车架、悬挂系统等；承受各种随时间变化的载荷的结构，如桥梁、建筑物等；以及承受撞击和颠簸的家电设备，如电话、计算机、真空吸尘器等，都可以用瞬态动力学分析来对它们动力响应过程中的刚度、强度进行计算模拟。

瞬态动力学分析包括线性瞬态动力学分析和非线性瞬态动力学分析两种分析类型。

所谓线性瞬态动力学分析，是指模型中不包括任何非线性行为，适用于线性材料、小位移、小应变、刚度不变的结构的瞬态动力学分析，其算法有两种：直接法和模态叠加法。

非线性瞬态动力学分析具有更广泛的应用，可以考虑各种非线性行为，如材料非线性、大变形、大位移、接触、碰撞等，本节主要介绍线性瞬态动力学分析。

10.1.2 瞬态动力学分析基本公式

经典力学理论可知，物体的动力学通用方程是：

$$[M]\{x^{''}\}+[C]\{x^{'}\}+[K]\{x\}=\{F(t)\}$$

式中，$[M]$ 是质量矩阵；$[C]$ 是阻尼矩阵；$[K]$ 是刚度矩阵；$\{x\}$ 是位移矢量；$\{F(t)\}$

是力矢量；$\{x'\}$是速度矢量；$\{x''\}$是加速度矢量。

10.2 瞬态动力学分析实例 1——建筑物地震分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的瞬态动力学分析模块，对钢构架模型进行瞬态动力学分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 瞬态动力学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Charpter10\ char10-1GANGJIEGOU.agdb
结果文件	网盘\Charpter10\ char10-1\Transient_Structural.wbpj

10.2.1 问题描述

计算前文所讲解钢构架模型在表 10-1 所列的地震加速度谱作用下的结构响应。

表 10-1 地震加速度谱数据 （单位：m/s^2）

时间步	竖向加速度	水平加速度	时间步	竖向加速度	水平加速度
0.1	0	0	2.6	1.2981	2.5962
0.2	0.2719	0.5437	2.7	2.3227	4.6453
0.3	1.1146	2.2292	2.8	2.3617	4.7235
0.4	1.1877	2.3753	2.9	−2.8035	−5.607
0.5	0.2243	0.4486	3.0	1.451	2.9021
0.6	−2.2734	−4.5468	3.1	−5.4473	−10.8946
0.7	−0.9515	−1.903	3.2	0.4774	0.9549
0.8	2.2938	4.5876	3.3	−10.1642	−110.3284
0.9	4.0099	10.0198	3.4	−0.3636	−0.7272
1.0	1.9812	3.9623	3.5	1.9913	3.9827
1.1	1.609	3.2181	3.6	2.2309	4.4618
1.2	−1.5037	−3.0074	3.7	−5.082	−10.164
1.3	1.626	3.2521	3.8	−3.8687	−7.7173
1.4	0.8003	1.6006	3.9	12.2624	24.5248
1.5	2.9513	5.9027	4.0	2.3651	4.7303
1.6	0.9056	1.8112	4.1	0.6898	1.3797
1.7	0.3075	0.6151	4.2	−10.2561	−12.5122
1.8	2.0678	4.1356	4.3	1.5258	3.0516
1.9	0.5182	1.0365	4.4	−3.5205	−7.0411
2.0	0.4825	0.9651	4.5	−0.4299	−0.8597
2.1	−3.3812	−10.7624	4.6	3.0907	10.1813
2.2	0.5216	1.0534	4.7	−0.3959	−0.7918
2.3	−2.9853	−5.9706	4.8	1.412	2.8239
2.4	−1.8435	−3.687	4.9	−4.1645	−10.329
2.5	−1.1061	−2.2122	5.0	1.1588	2.3176

10.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 10-1 所示。

10.2.3 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 10-2 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 GANGJIEGOU.agdb 几何体文件，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

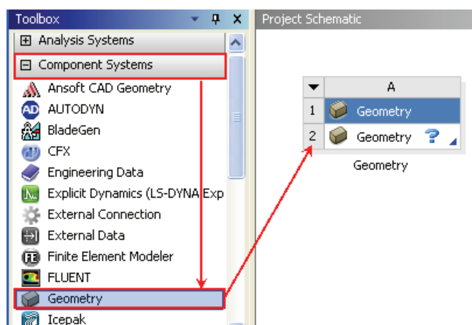


图 10-1 创建分析项目 A

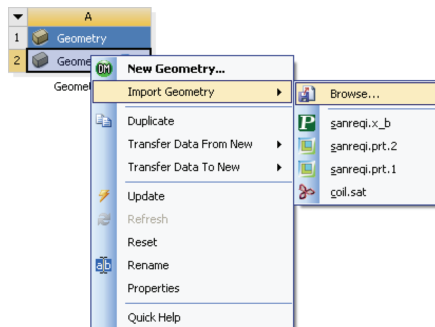


图 10-2 导入几何体

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，在 DesignModeler 软件绘图区域会显示几何模型，如图 10-3 所示。

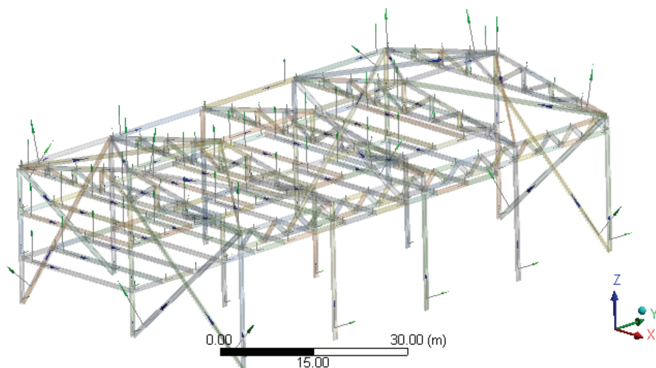


图 10-3 生成 DesignModeler 界面

Step4：单击工具栏上的按钮保存文件，此时弹出的“另存为”对话框，输入文件名为 Transient_Structural，单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面并单击右上角的（关闭）按钮，退出



DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

10.2.4 瞬态动力学分析

Step1：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→TransientStructural（瞬态动力学分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 B（TransientStructural），如图 10-4 所示。

Step2：如图 10-5 所示，单击项目 A 中的 A2（Geometry）直接拖拽到项目 B 的 B3（Geometry）中。

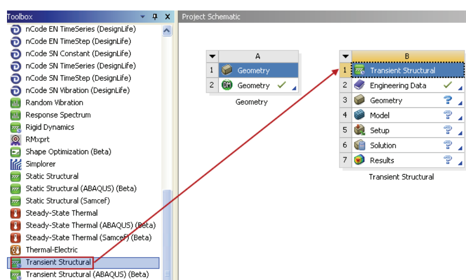


图 10-4　创建瞬态动力学分析

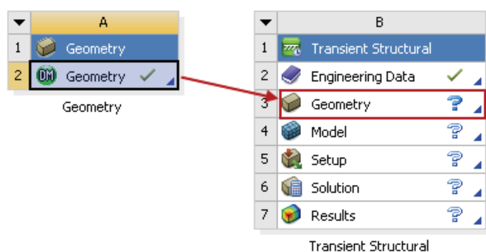


图 10-5　几何数据共享

10.2.5 添加材料库

本实例选择的材料为 Structural Steel（结构钢），此材料为 ANSYS Workbench 16.0 默认被选中的材料，故不需要设置。

10.2.6 划分网格

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model），此时会出现 Mechanical 界面，如图 10-6 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 10-7 所示在 Sizing→Element Size 中输入 0.5m，其余采用默认设置。

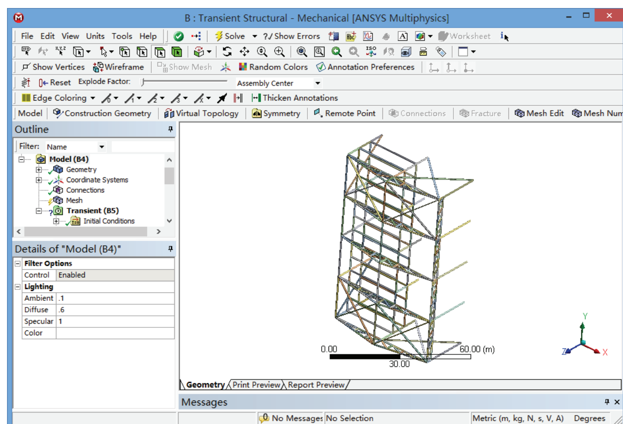


图 10-6　Mechanical 界面

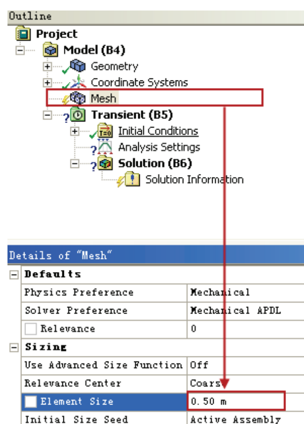


图 10-7　设置网格大小

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出图 10-8 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 10-9 所示。

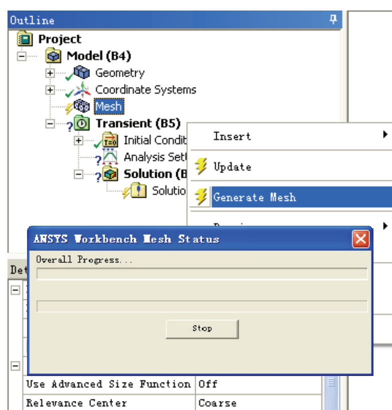


图 10-8 划分网格进度显示

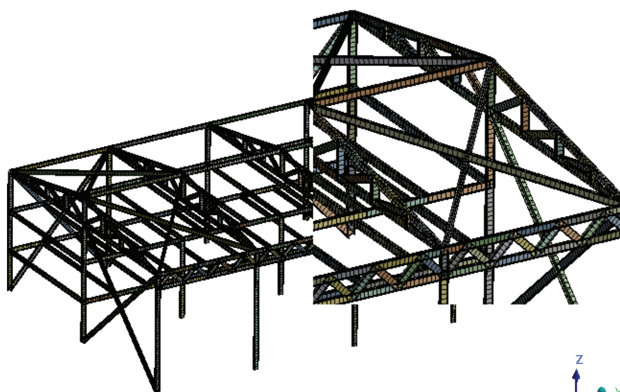


图 10-9 划分网格效果

10.2.7 施加约束

Step1：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 10-10 所示。

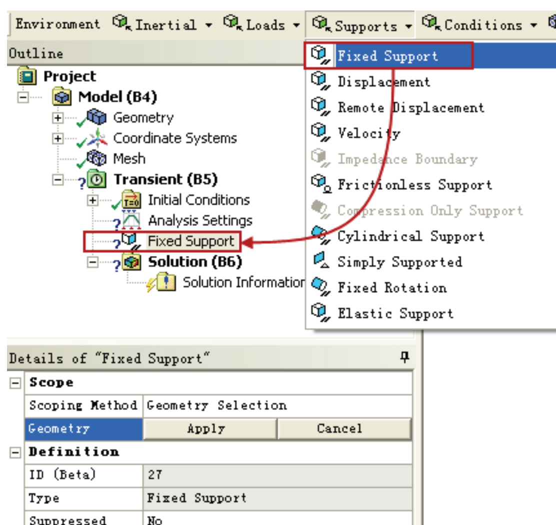


图 10-10 添加固定约束

Step2：单击工具栏中的（选择点）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选中 Fixed Support，选择钢构架的下端 6 个节点，单击 Details of “Fixed Support” 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 10-11 所示。

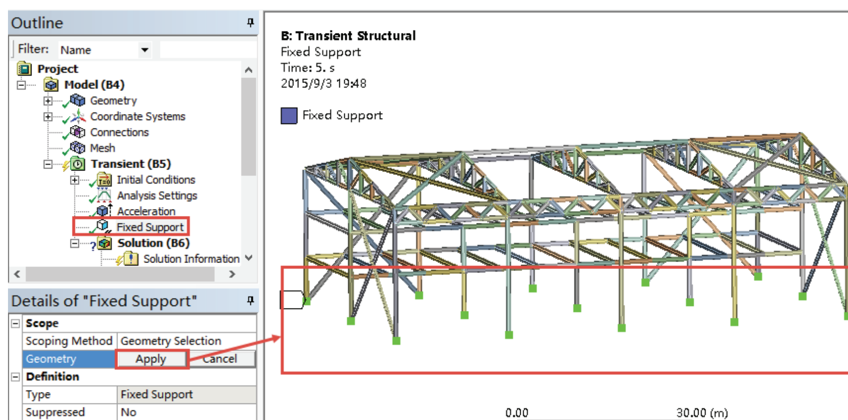


图 10-11　施加固定约束

Step3：分析设置。单击 Transient（B5）下面的 Analysis Settings 命令，在出现的图 10-12 所示的 Details of“Analysis Settings”面板中进行如下设置。

在 Number Of Steps 栏中输入 50，设置总时间步为 50。

在 Current Step Number 栏中输入 1，设置当前时间步。

在 Step End Time 栏中输入 0.1s，设置第一个时间步结束的时间为 0.1s。

在 Number Of Substeps 栏中如入 5，设置子时间步为 5 步。

在 Solver Type 栏中选择求解器类型为 Direct（直接求解器）。

其余选项默认即可。

Step4：同样设置其余 49 个时间步的上述参数，完成后如图 10-13 所示。

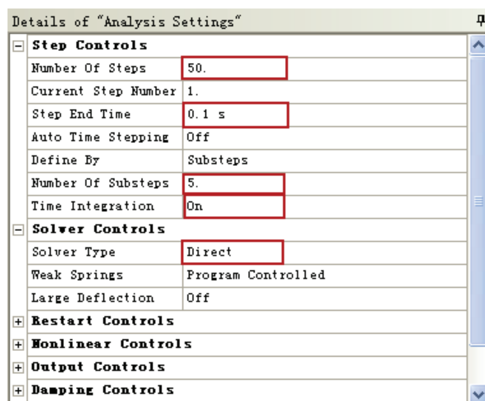


图 10-12　分析设置

Tabular Data

	Steps	End Time [s]		Steps	End Time [s]
1	1	0.1	26	26	2.6
2	2	0.2	27	27	2.7
3	3	0.3	28	28	2.8
4	4	0.4	29	29	2.9
5	5	0.5	30	30	3.
6	6	0.6	31	31	3.1
7	7	0.7	32	32	3.2
8	8	0.8	33	33	3.3
9	9	0.9	34	34	3.4
10	10	1.	35	35	3.5
11	11	1.1	36	36	3.6
12	12	1.2	37	37	3.7
13	13	1.3	38	38	3.8
14	14	1.4	39	39	3.9
15	15	1.5	40	40	4.
16	16	1.6	41	41	4.1
17	17	1.7	42	42	4.2
18	18	1.8	43	43	4.3
19	19	1.9	44	44	4.4
20	20	2.	45	45	4.5
21	21	2.1	46	46	4.6
22	22	2.2	47	47	4.7
23	23	2.3	48	48	4.8
24	24	2.4	49	49	4.9
25	25	2.5	50	50	5.

图 10-13　时间步输入

Step5：选择 Transient（B5）命令，单击工具栏中 Inertial（惯性）→Acceleration（加速度）选项，在图 10-14 所示的 Details of“Acceleration”面板中进行如下设置。

在 Define By 栏中选择 Components 选项，此时下面会出现 X Component、Y Component

及 Z Component 3 个输入栏。

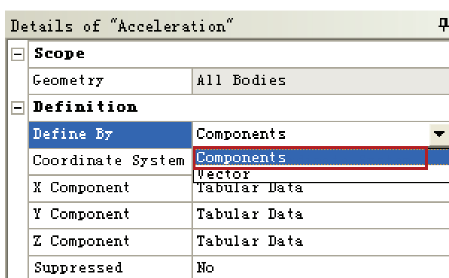


图 10-14　设置加速度类型

Step6： 将表 10-1 中数值输入到右下侧的 Tabular Data 表中，输入完成后如图 10-15 所示。

Tabular Data

	Steps	Time [s]	X [m/s²]	Y [m/s²]	Z [m/s²]
1	1	0.	0.	0.	0.
2	1	0.1	0.	0.	0.
3	2	0.2	0.5437	0.2719	0.
4	3	0.3	2.2292	1.1146	0.
5	4	0.4	2.3753	1.1877	0.
6	5	0.5	0.4486	0.2243	0.
7	6	0.6	-4.5468	-2.2734	0.
8	7	0.7	-1.903	-0.9515	0.
9	8	0.8	4.5876	2.2938	0.
10	9	0.9	8.0198	4.0099	0.
11	10	1.	3.9623	1.9812	0.
12	11	1.1	3.2181	1.609	0.
13	12	1.2	-3.0074	-1.5037	0.
14	13	1.3	3.2521	1.626	0.
15	14	1.4	1.6006	0.8003	0.
16	15	1.5	5.9027	2.9513	0.
17	16	1.6	1.8112	0.9056	0.
18	17	1.7	0.6151	0.3075	0.
19	18	1.8	4.1356	2.0678	0.
20	19	1.9	1.0365	0.5182	0.
21	20	2.	0.9651	0.4825	0.
22	21	2.1	-6.7624	-3.3812	0.
23	22	2.2	1.0534	0.5216	0.
24	23	2.3	-5.9706	-2.9853	0.
25	24	2.4	-3.687	-1.8435	0.
26	25	2.5	-2.2122	-1.1061	0.
27	26	2.6	2.5962	1.2981	0.
28	27	2.7	4.6453	2.3227	0.
29	28	2.8	4.7235	2.3617	0.
30	29	2.9	-5.607	-2.8035	0.
31	30	3.	2.9021	1.451	0.
32	31	3.1	-10.895	-5.4473	0.
33	32	3.2	0.9549	0.4774	0.
34	33	3.3	-16.328	-8.1642	0.
35	34	3.4	-0.7272	-0.3636	0.
36	35	3.5	3.9827	1.9913	0.
37	36	3.6	4.4618	2.2309	0.
38	37	3.7	-10.164	-5.082	0.
39	38	3.8	-7.7173	-3.8687	0.
40	39	3.9	24.525	12.262	0.
41	40	4.	4.7303	2.3651	0.
42	41	4.1	1.3797	0.6898	0.
43	42	4.2	-12.512	-6.2561	0.
44	43	4.3	3.0516	1.5258	0.
45	44	4.4	-7.0411	-3.5205	0.
46	45	4.5	-0.8597	-0.4299	0.
47	46	4.6	6.1813	3.0907	0.
48	47	4.7	-0.7918	-0.3959	0.
49	48	4.8	2.8239	1.412	0.
50	49	4.9	-8.329	-4.1645	0.
51	50	5.	2.3176	1.1588	0.
*					

图 10-15　输入加速度谱值

Step7： 在 Outlines（分析树）中的 Transient（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 10-16 所示。

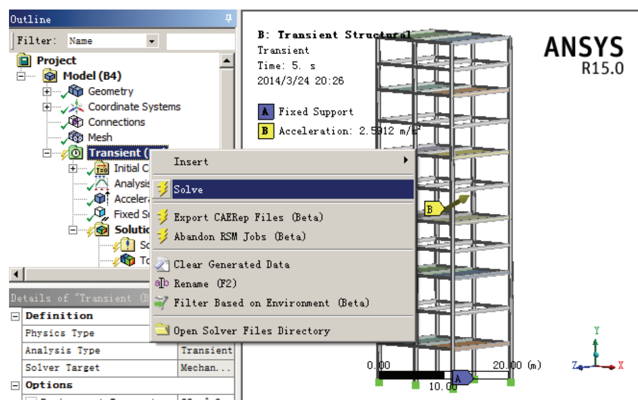


图 10-16　求解



10.2.8 结果后处理

Step1：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 10-17 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

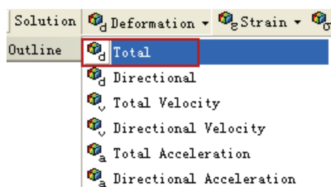


图 10-17　添加变形选项

Step2：在 Outlines（分析树）的 Solution（B6）选项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 10-18 为总变形云图。

Step3：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total Acceleration 命令，此时在分析树中会出现 Total Acceleration（总加速度）选项。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）→Total Acceleration（总加速度），此时会出现图 10-19 加速度云图。

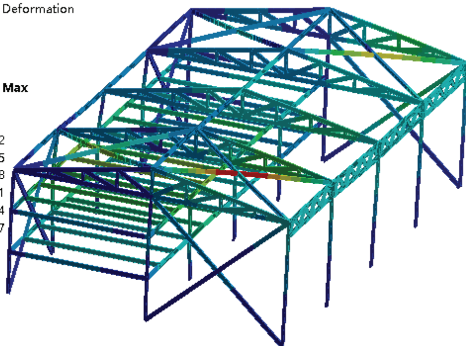


图 10-18　总变形云图

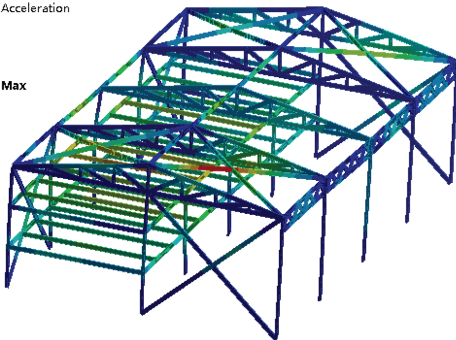


图 10-19　总加速度云图

Step5：右键选择 Solution→Insert→Beam→Axial Force（梁单元内力）命令，如图 10-20 所示。

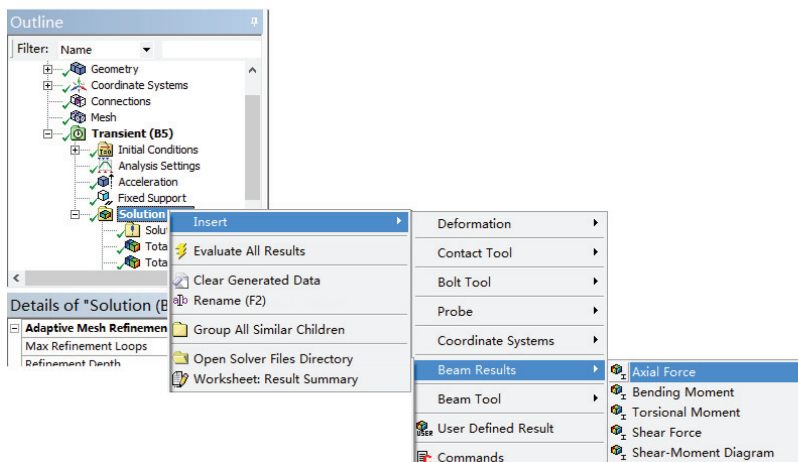


图 10-20　内力选项

Step6： 同样选择 Bending Moment（弯矩）、Torsional Moment（扭矩）及 Shear Force（剪切力）命令。

Step7： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令。

Step8： 选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）→Axial Force 选项，此时会出现图 10-21 内力分布云图。

Step9： 同样查看 Bending Moment（弯矩）、Torsional Moment（扭矩）及 Shear Force（剪切力）分布云图，如图 10-22～图 10-24 所示。

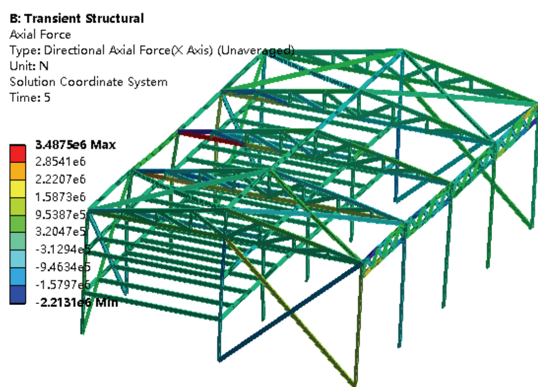


图 10-21　内力分布云图

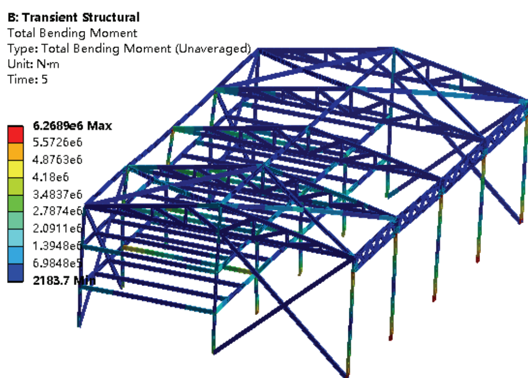


图 10-22　弯矩分布云图

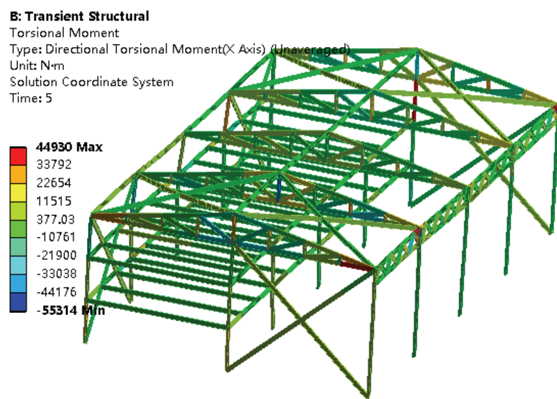


图 10-23　扭矩分布云图

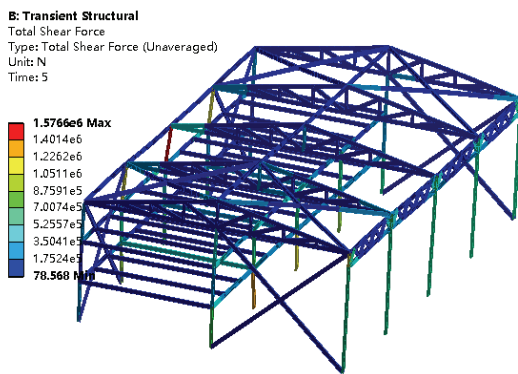


图 10-24　剪切力分布云图

Step10： 单击图 10-25 所示图标可以播放相应后处理的动画，单击 图标可以输出动画。

Step11： 选择图示的节点，右键选择 Solution→Insert→Probe→Deformation 命令，如图 10-26 所示。

Step12： 图 10-27 所示为钢构件顶点某节点在地震作用下的位移曲线。



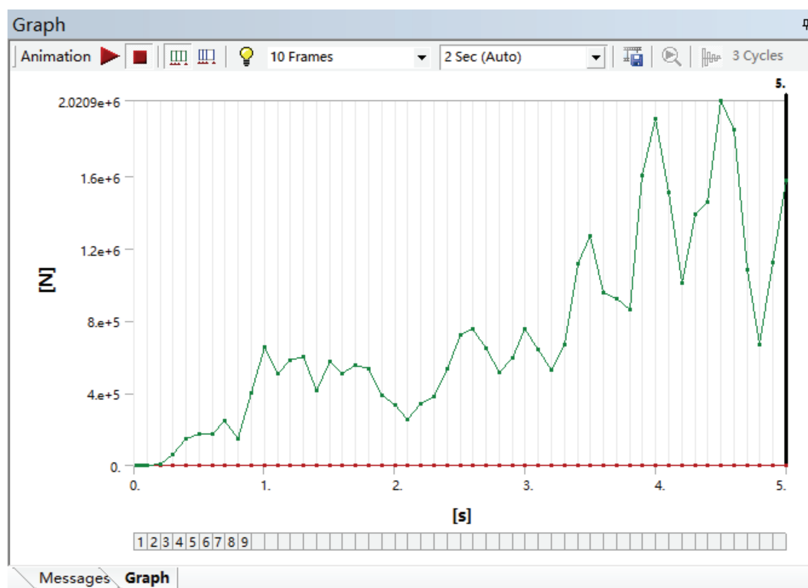


图 10-25　动态显示及动画输出

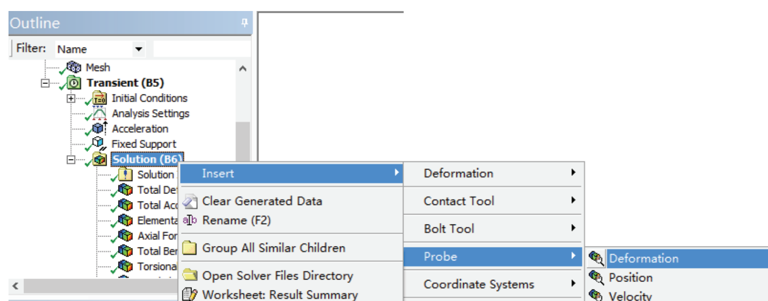


图 10-26　后处理

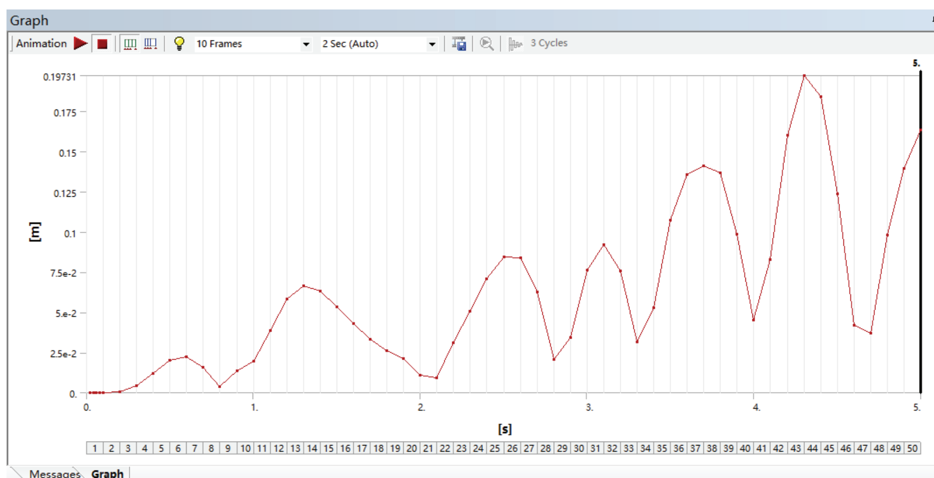


图 10-27　节点位移曲线

10.2.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3：单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

10.3 瞬态动力学分析实例 2——振动分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的瞬态动力学分析模块，计算实体梁模型在 1000N 瞬态力作用下的位移响应。

学习目的：熟练掌握 ANSYS Workbench 瞬态动力学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Charpter10\ char10-2\Geom.agdb
结果文件	网盘\Charpter10\ char10-2\Transient.wbpj

10.3.1 问题描述

某如图 10-28 所示实体梁模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算弹簧模型在-Y 方向作用 1000N 的瞬态力下的位移响应情况。

10.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 10-29 所示。



图 10-28 实体梁模型

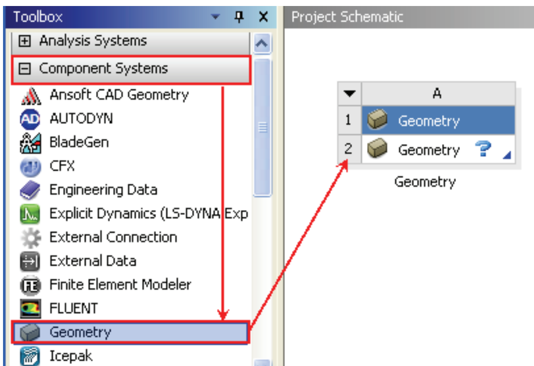


图 10-29 创建分析项目 A

10.3.3 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→

Browse 命令，如图 10-30 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：选择文件路径，如图 10-31 所示，选择文件 Geom.agdb，并单击“打开”按钮。

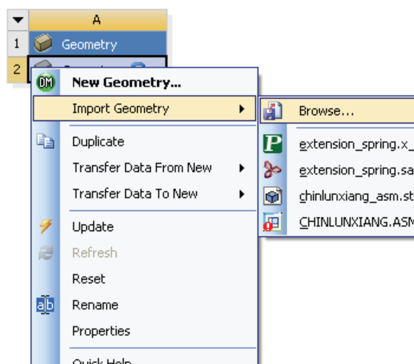


图 10-30　导入几何体

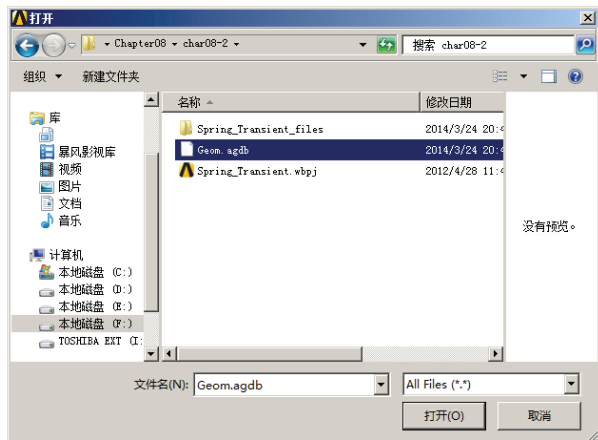


图 10-31　选择文件

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry），此时会加载 DesignModeler，设置单位为 mm，关闭单位设置对话框，如图 10-32 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成弹簧几何实体。

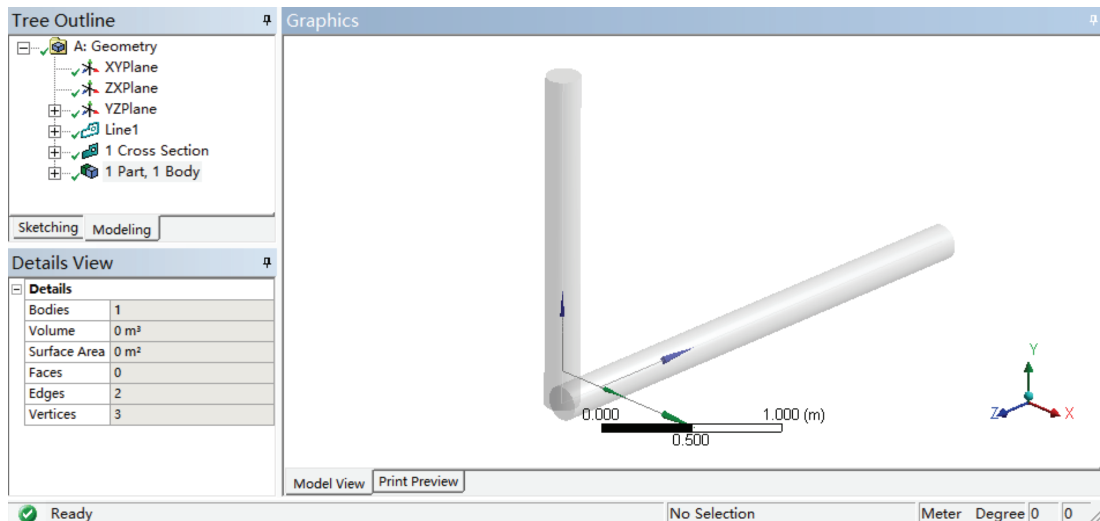


图 10-32　生成几何

Step4：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

10.3.4 模态分析

Step1：单击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）选项，如图 10-33 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右

侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

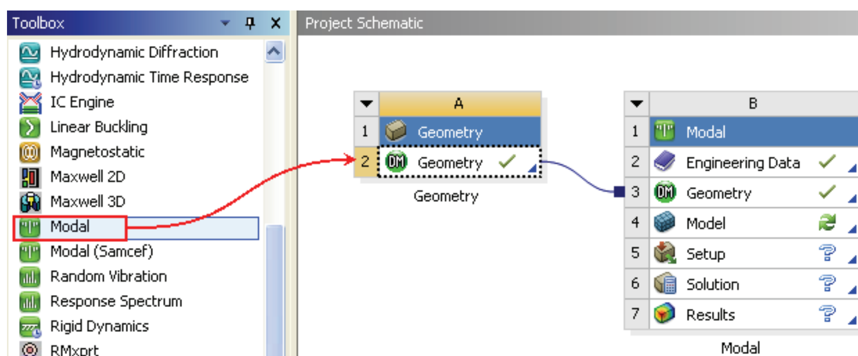


图 10-33 创建模态分析

10.3.5 模态分析前处理

Step1： 双击项目 B 中的 B4（Model），添加一个 Point Mass 属性，如图 10-34 所示，在 Detail of “Point Mass”栏中进行如下设置。

在 Geometry 栏中确保右侧的节点被选中，此时将显示 1Vertex 字样。

在 Mass 栏中输入 50kg。

Step2： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of“Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 10-35 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中选择 Fine 项，其余采用默认设置。

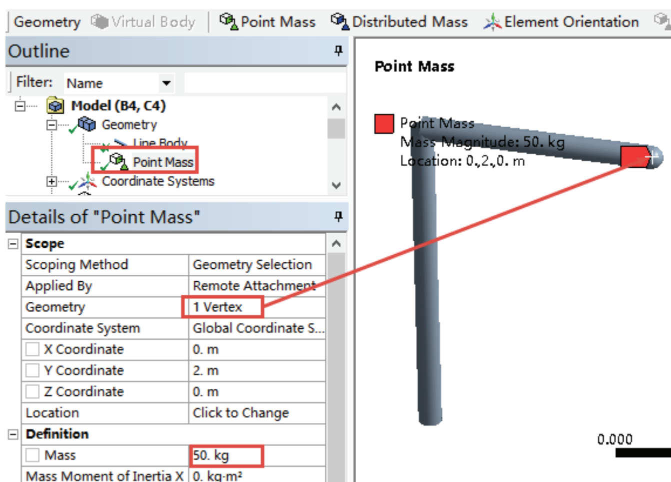


图 10-34 节点质量

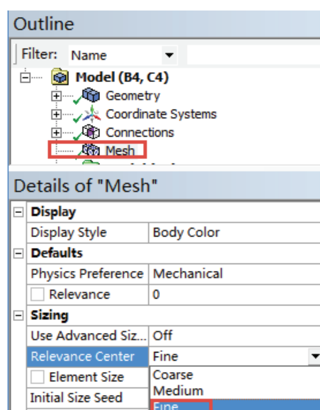
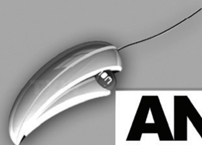


图 10-35 设置网格大小

Step3： 在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出图 10-36 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 10-37 所示。



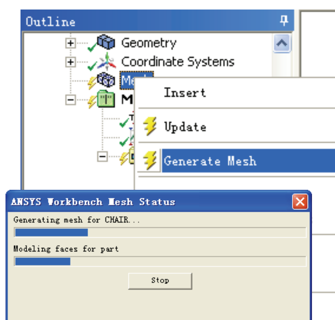


图 10-36　划分网格进度显示

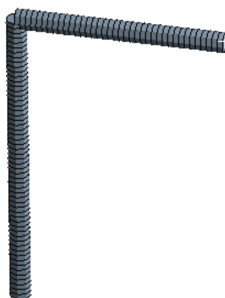


图 10-37　网格划分效果

10.3.6 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Modal（B5）选项，此时会出现图 10-38 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 10-39 所示。

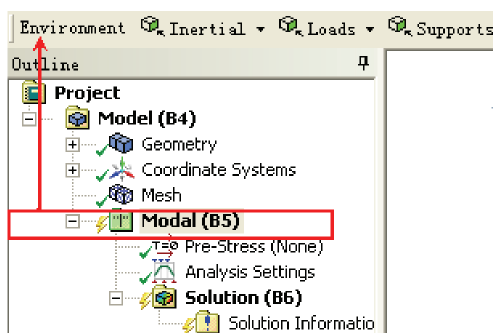


图 10-38　Environment 工具栏

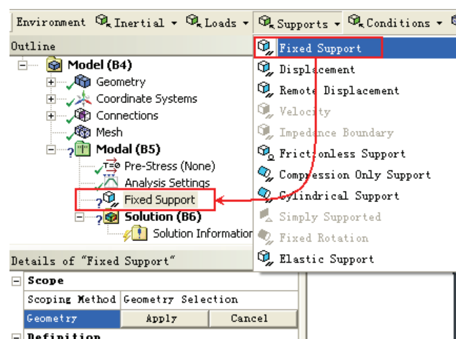


图 10-39　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选中 Fixed Support 选项，选择实体单元的一端（位于 Z 轴最大值的一端），单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 10-40 所示。

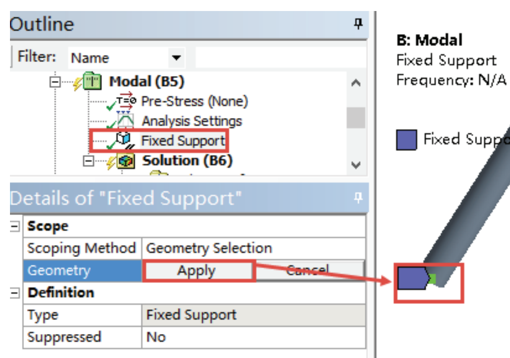


图 10-40　施加固定约束

Step4： 在 Outlines（分析树）中的 Modal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 10-41 所示。

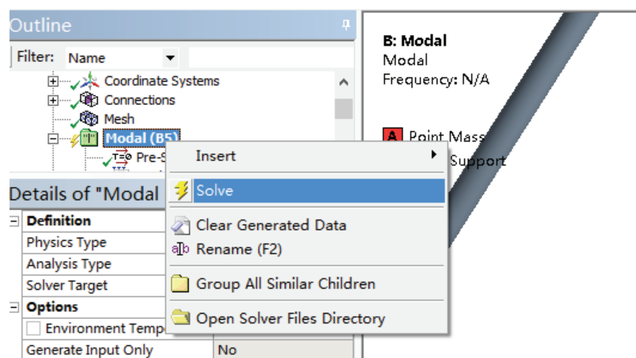


图 10-41 求解

10.3.7 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（B6）选项，此时会出现图 10-42 所示的 Solution 工具栏。

Step2： 选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 10-43 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

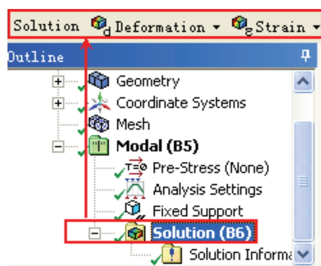


图 10-42 Solution 工具栏

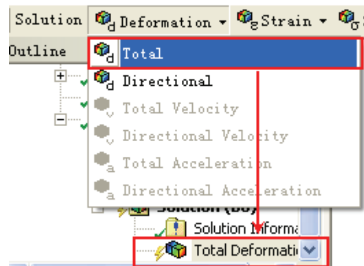


图 10-43 添加变形选项

Step3： 在 Outlines（分析树）→Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Equivalent All Results 命令，如图 10-44 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4： 选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形），此时会出现图 10-45 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step5： 如图 10-46 所示为计算机机箱前六阶模态频率。

Step6： ANSYS Workbench 16.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）→Modal（B5）→Analysis Settings（分析设置选项）选项，在图 10-47 所示的 Details of “Analysis Settings” 下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

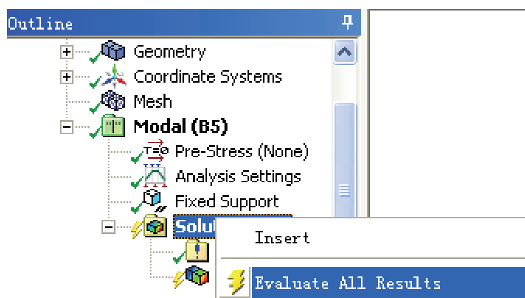


图 10-44　快捷菜单

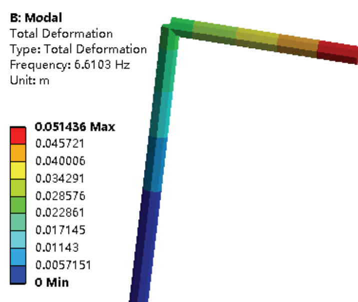


图 10-45　一阶变形分析云图

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	6.6103
2	2.	6.7851
3	3.	18.051
4	4.	20.852
5	5.	78.118
6	6.	87.306

图 10-46　六阶模态频率

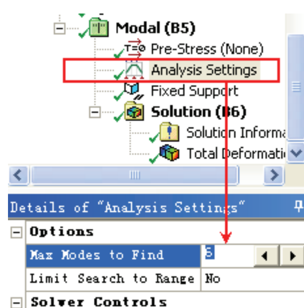


图 10-47　修改模态数量选项

Step7：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

10.3.8 瞬态动力学分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 10-48 所示，选择 Toolbox（工具箱）→Analysis Systems→Transient Structural（瞬态分析）选项不放，直接拖拽到项目 B（Modal）的 B6 中。

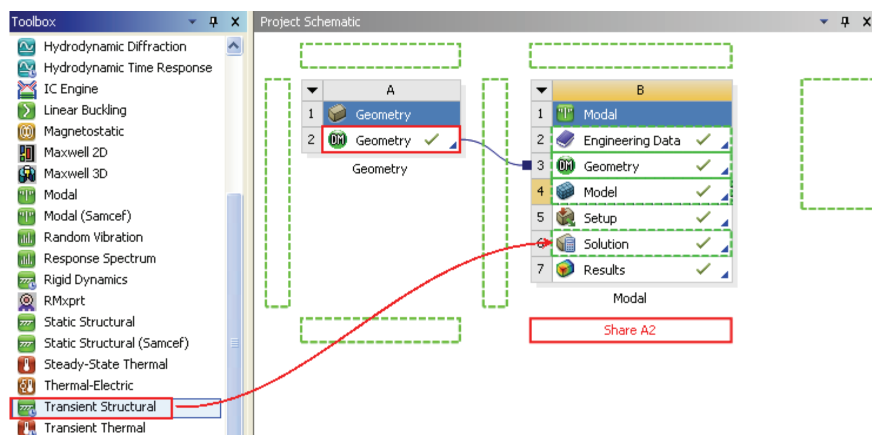


图 10-48　瞬态动力学分析

Step2： 如图 10-49 所示，项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现 标示。

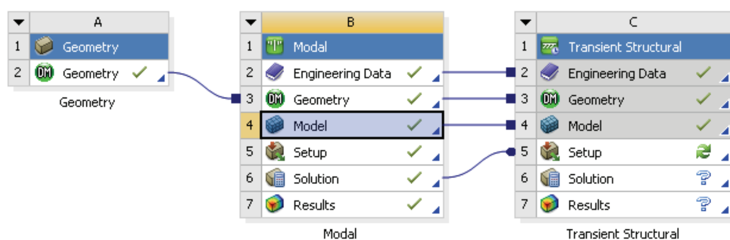


图 10-49　数据共享

Step3： 如图 10-50 所示，双击项目 C 的 C5（Setup）命令，进入 Mechanical 界面。

Step4： 如图 10-51 所示，在 Outlines（分析树）中的 Modal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

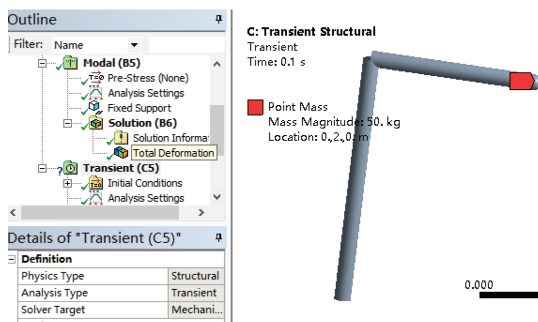


图 10-50　Mechanical 界面

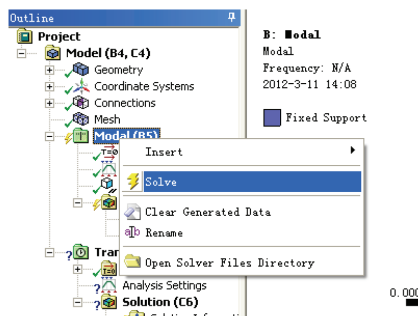


图 10-51　执行模态计算

10.3.9 添加动态力载荷

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Transient Structural（C5）选项，此时会出现图 10-52 所示的 Environment 工具栏。

Step2： 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，如图 10-53 所示，此时在分析树中会出现 Force 选项。

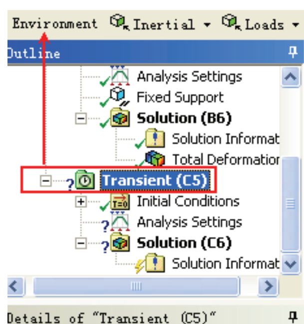


图 10-52　Environment 工具栏

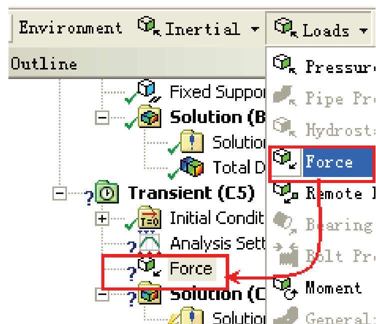


图 10-53　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Transient Structural（C5）→Force（力）选项，在下面出现的图 10-54 所示的 Details of “Force” 面板中进行如下更改。

在 Scope→Geometry 中选择圆柱底端。

在 Definition→Define By 栏中选择 “Components” 选项，然后在右侧的 X Component 表格中选择 Tabular（Time）选项；保持 Y Component 和 Z Component 值为 0。

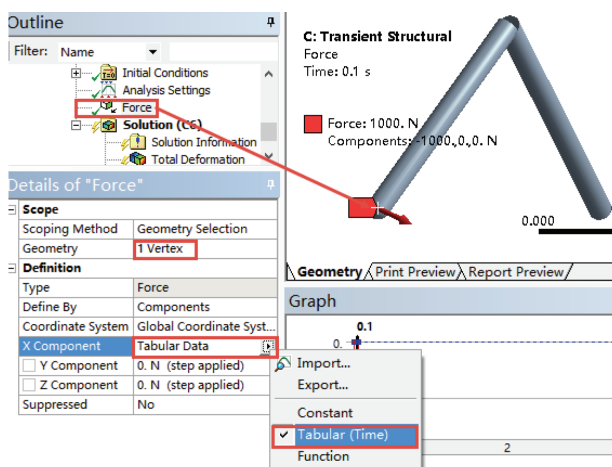


图 10-54　力属性面板

Step4：在 Outlines（分析树）中选择 Transient（C5）→Analysis Settings（分析设置）选项，如图 10-55 所示，在出现的 Details of “Analysis Settings” 面板中进行如下输入。

在 Number Of Steps 栏中输入 2，表示计算共有两个分析步。

在 Current Step Number 栏中输入 1，表示当前分析为步骤 1。

在 Step End Time 栏中输入 0.1s，表示这个分析步持续时间为 0.1s。

在 Time Step 栏中输入 0.01s，表示时间步为 0.01s。

Step5：同样，如图 10-56 所示，在 Current Step Number 栏中输入 2，在 Step End Time 栏中输入 10s。

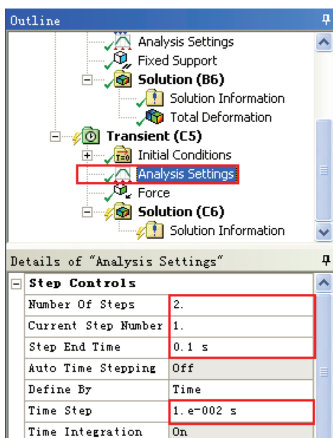


图 10-55　分析步一设定

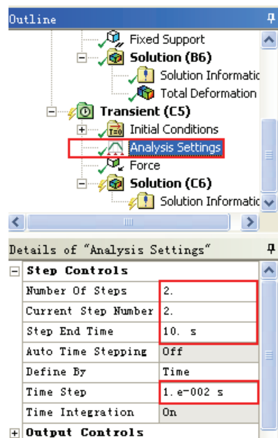


图 10-56　分析步二设定

Step6： 单击图 10-57 所示的 Force 命令，右下角会弹出一个 Tabular Data 表格，在表格中输入下表数值：

	Steps	Times（s）	X[N]	Y[N]	Z[N]
1	1	0	0	0	0
2	1	0.1	-1000	0	0
3	2	0.15	0	0	0
4	2	10	0	0	0

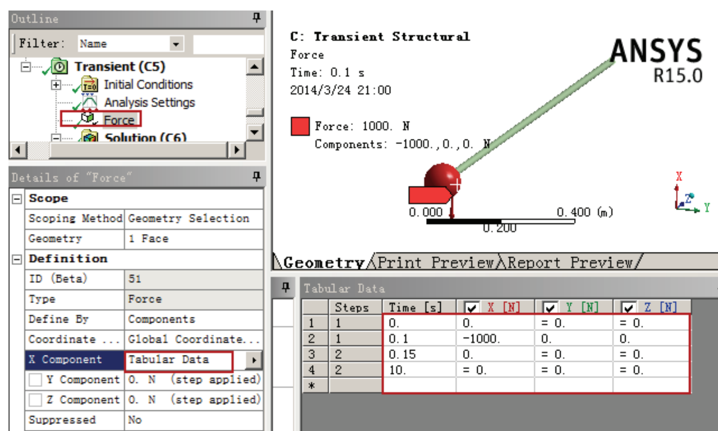


图 10-57　输入数值

Step7： 如图 10-58 所示，选择 Transient（C5）→Analysis Settings 命令，在出现的 Details of “Analysis Settings”面板中进行如下输入。

在 Damping Controls→Numerical Damping 栏中选择 Manual 选项。

在 Numerical Damping 栏中将阻尼比改成.002。

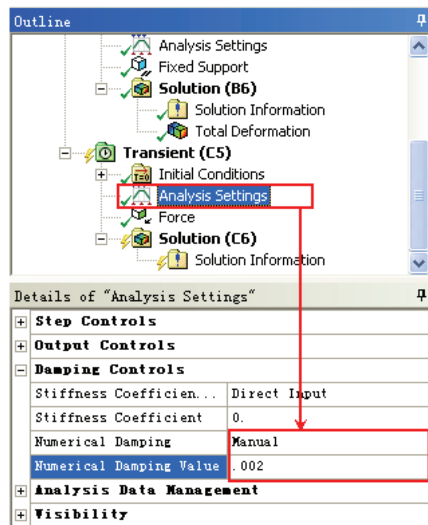


图 10-58　设定阻尼比

Step8：如图 10-59 所示，在 Transient（C5）命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

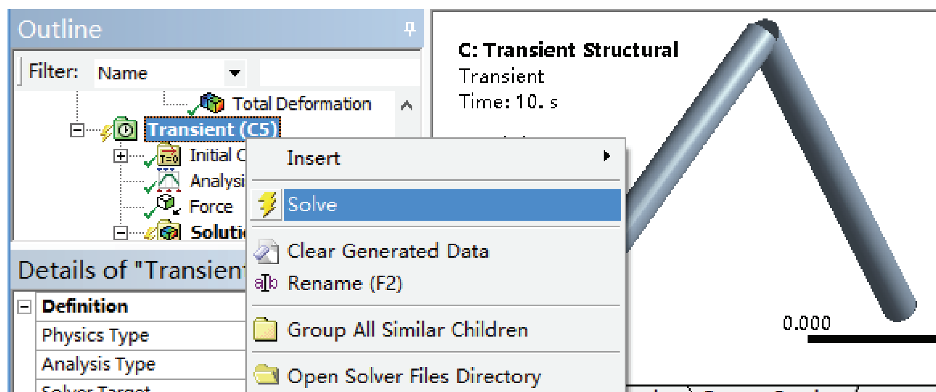


图 10-59　计算求解

10.3.10 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（C6）选项，此时会出现图 10-60 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 10-61 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation 选项。

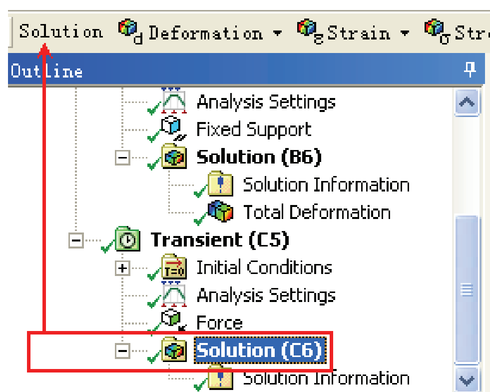


图 10-60　Solution 工具栏

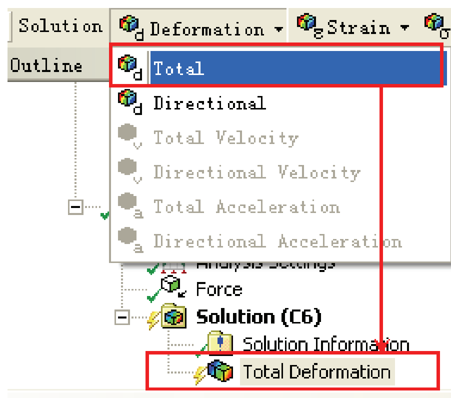


图 10-61　添加变形选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（C6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Evaluate All Results 命令，如图 10-62 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Directional Deformation 选项，此时会出现图 10-63 所示的变形分析云图。

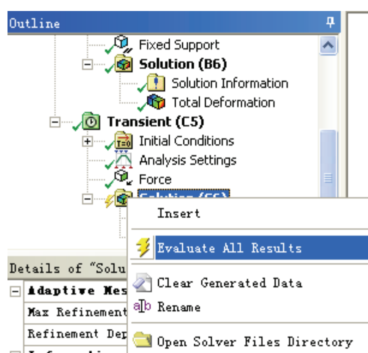


图 10-62　快捷菜单

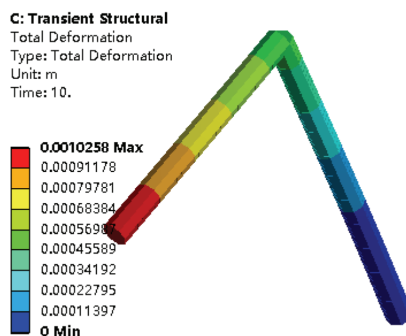


图 10-63　变形分析云图

Step5：图 10-64 所示为位移随时间变化曲线。

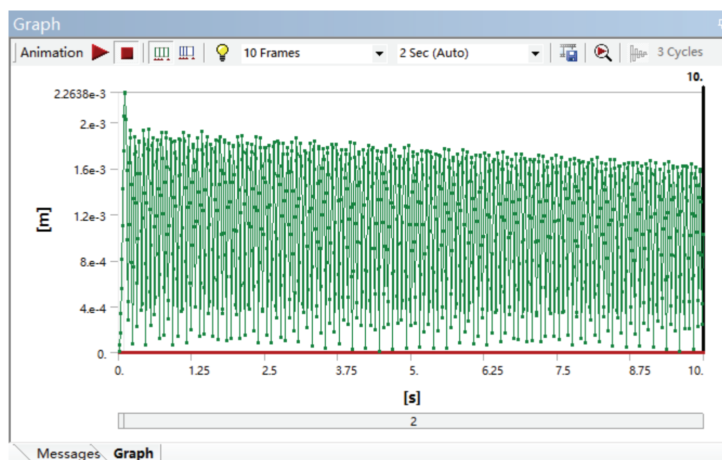


图 10-64　位移响应曲线

Step6：如图 10-65 和图 10-66 所示为直接应力云图及应力随时间变化曲线。

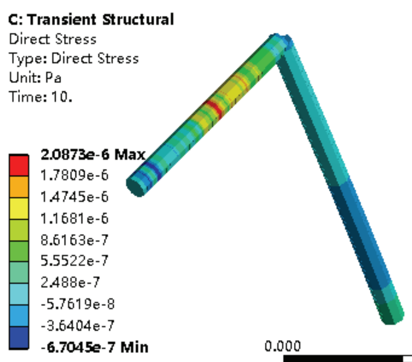


图 10-65　直接应力云图

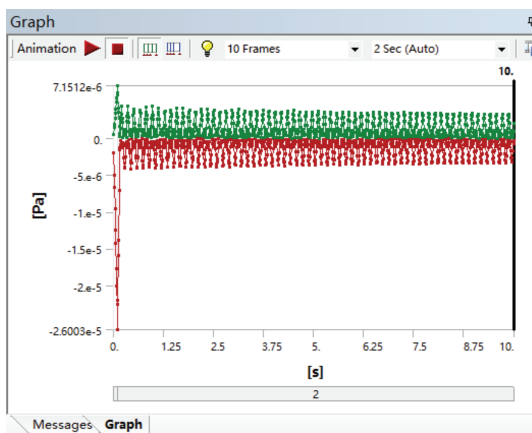


图 10-66　应力响应曲线

10.3.11 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Spring_Transient。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

10.4 本章小结

本章通过两个典型案例，介绍了瞬态动力学分析的一般过程，包括材料导入与建模、材料选择与材料属性赋予、有限元网格的划分、对模型施加边界条件与外载荷及结构后处理等。同时也通过一些简单操作，介绍了瞬态动力学分析优化设计的方法与一般步骤，请读者参考帮助文档详细学习。

通过本章节的学习，读者应对 ANSYS Workbench 瞬态动力学分析模块及操作步骤有详细的了解，同时熟料掌握操作步骤与分析方法。

第 11 章 线性屈曲分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的线性屈曲分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对线性屈曲分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
线性屈曲分析知识		√		
线性屈曲分析应用		√		
ANSYS Workbench 线性屈曲分析基本过程			√	√

11.1 线性屈曲分析简介

许多结构都需要进行结构稳定性计算，如细长柱、压缩部件、真空容器等。这些结构件在不稳定（屈曲）开始时，结构在本质上没有变化的载荷作用下（超过一个很小的动荡）在 X 方向上的微小位移会使得结构有一个很大的改变。

11.1.1 屈曲分析

特征值或线性屈曲分析预测的是理想线弹性结构的理论屈曲强度（分歧点）；而非理想和非线性行为阻止许多真实的结构达到理论上的弹性屈曲强度。

线性屈曲通常产生非保守的结果，但是线性屈曲有以下几个优点。

- 它比非线性屈曲计算更节省时间，并且应当作第一步计算来评估临界载荷（屈曲开始时的载荷）。
- 线性屈曲分析可以用来作为决定产生什么样的屈曲模型形状的设计工具，为设计做指导。

11.1.2 线性屈曲分析

线性屈曲分析一般方程为

$$(\boldsymbol{K}+\lambda_i \boldsymbol{S}\boldsymbol{\psi}_i=0 \qquad (11\text{-}1)$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{S}$ 是常量；λ_i 是屈曲载荷乘子，$\boldsymbol{\psi}_i$ 是屈曲模态。

ANSYS Workbench 16.0 屈曲模态分析步骤与其他有限元分析步骤大同小异，软件支持在模态分析中存在接触对，但是由于屈曲分析是线性分析，所以接触行为不同于非线性接触行为。

下面通过几个实例简单介绍一下线性屈曲分析的操作步骤。

11.2 项目案例 1——钢管屈曲分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的屈曲分析模块，计算模型在外载荷作用下的稳定性及屈曲因子。

学习目的：熟练掌握 ANSYS Workbench 屈曲分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter11\char11-1\Pipe_Bukling.wbpj

11.2.1 问题描述

如图 11-1 所示模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算模型在 1MPa 的压力下的屈曲响应情况。

11.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 11-2 所示。

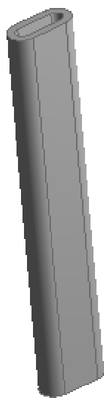


图 11-1 模型

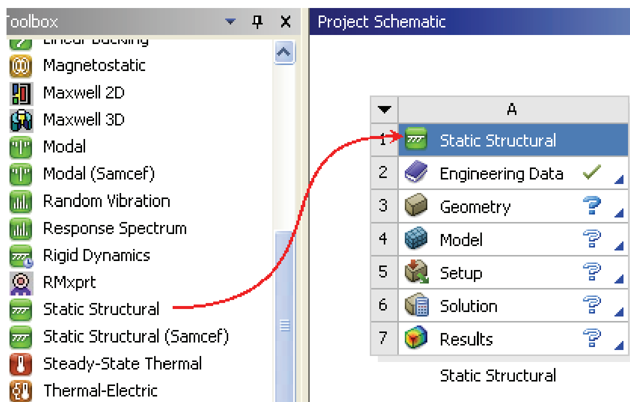


图 11-2 创建分析项目 A

11.2.3 创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上双击，弹出图 11-3 所示的 DesignModeler 软件窗口，选择菜单 Units→Meter，设置长度单位为 m。

Step2：如图 11-4 所示，单击 ZXPlane 命令选择绘图平面，然后再单击按钮，使得绘图平面与绘图区域平行。

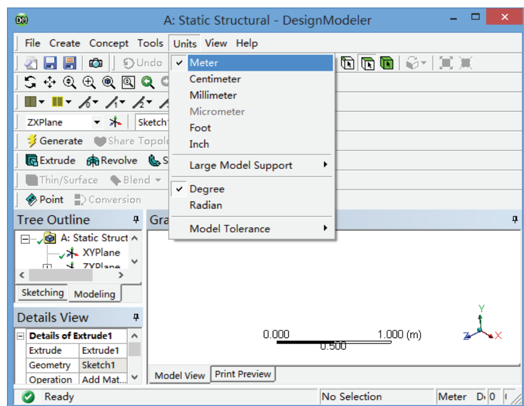


图 11-3 设置单位

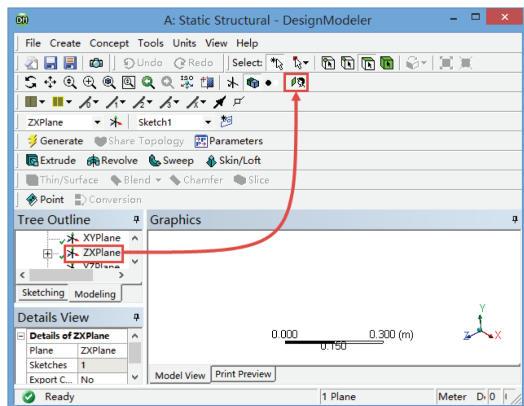


图 11-4 选择绘图平面

Step3： 在 Tree Outline 下面单击 Sketching 按钮，此时会出现图 11-5 所示的 Sketching Toolbox（草绘工具箱），草绘所有命令都在 Sketching Toolbox 中。

Step4： 单击 Oval （鹅卵石形状）按钮，此时按钮变成凹陷状态，表示本命令已被选中，将鼠标移动到绘图区域中左侧横坐标位置，此时会出现一个 C 提示符，如图 11-6 所示。

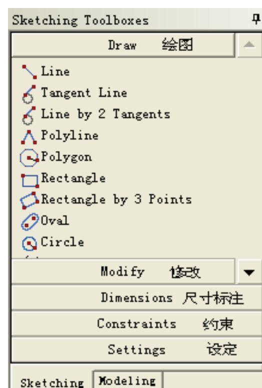


图 11-5 Sketching Toolbox

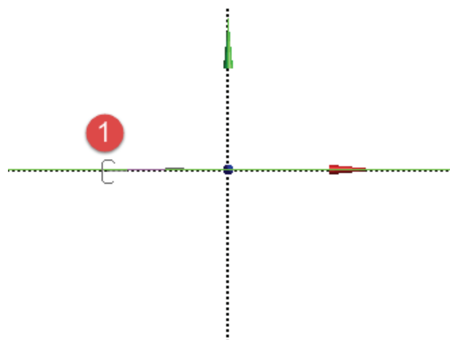


图 11-6 草绘

Step5： 当出现 C 提示符后，单击创建第一角点，然后向右侧移动鼠标创建图 11-7 所示的创建第二个角点。

Step6： 重复上述步骤创建另一个鹅卵石形状，如图 11-8 所示。

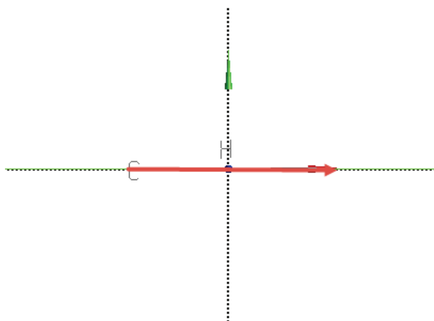


图 11-7 坐标原点提示符

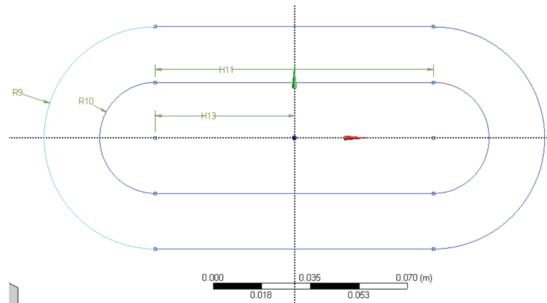


图 11-8 创建鹅卵石形状

Step7： 创建图 11-9 所示的尺寸标注，在 R9 栏中输入 0.04m，在 R10 栏中输入 0.02m，在 H11 栏中输入 0. 1m，在 H13 栏中输入 0.1m。

Step8： 单击工具栏中的 Extrude 拉伸命令，如图 11-10 所示，在 Details View 面板中 Geometry 下面选择 Sketch1 单击 Apply 按钮，在 Depth 栏中输入拉伸长度为 1m，然后单击工具栏中的 Generate 按钮，生成几何模型。

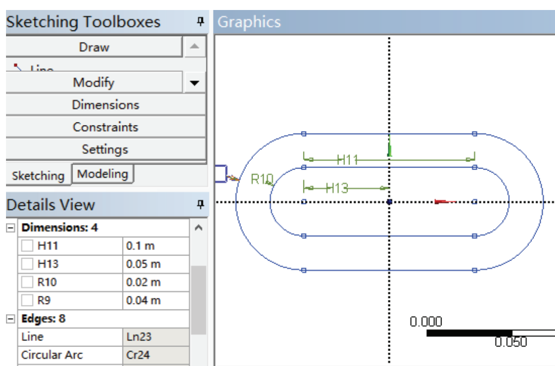


图 11-9　标注

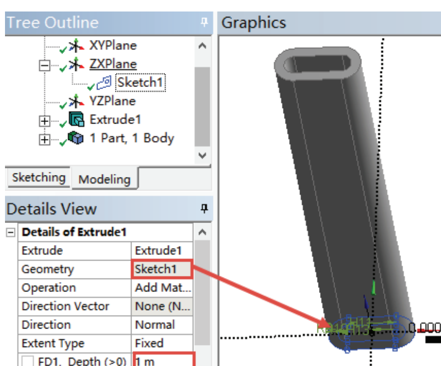


图 11-10　拉伸

Step9： 单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

11.2.4 设置材料

本案例选用默认材料，即 Structural Steel。

11.2.5 添加模型材料属性

Step1： 双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 11-11 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step2： 如图 11-12 所示，此时 Structural Steel 材料已经被自动赋予模型。

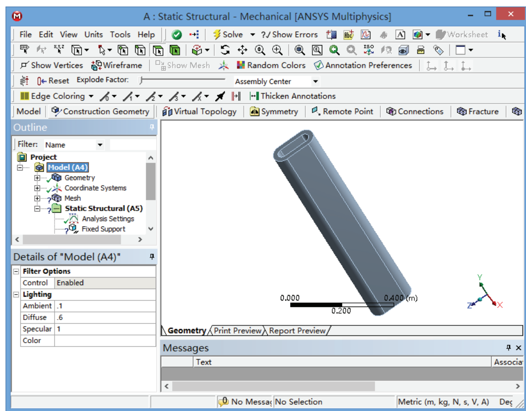


图 11-11　Mechanical 界面

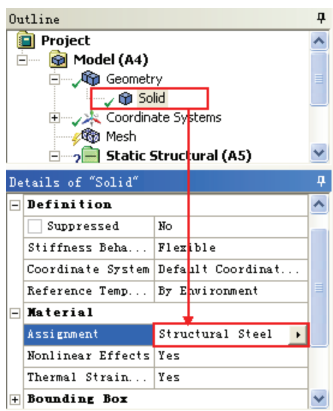


图 11-12　添加材料

11.2.6 划分网格

Step1：如图 11-13 所示，右键选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Mapping Face Meshing 命令。

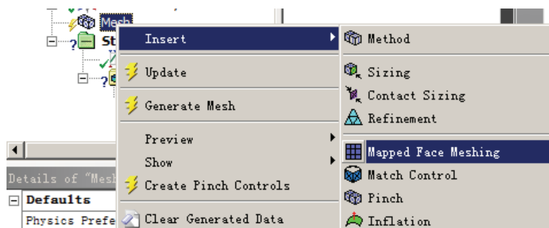


图 11-13 生成网格

Step2：如图 11-14 所示，在出现的 Details of“Mapping Face Meshing”面板中进行如下设置。

选择模型上表面单击 Geometry 栏中的 Apply 按钮。

在 Internal Number of Divisions 栏中输入 4。

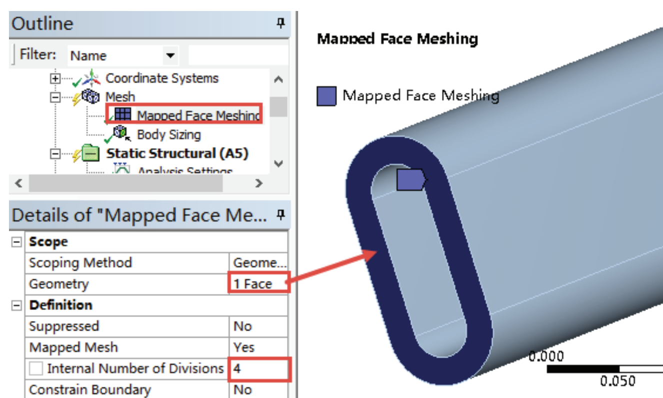


图 11-14 设置面网格

Step3：如图 11-15 所示，右键单击 Mesh 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Sizing 命令。

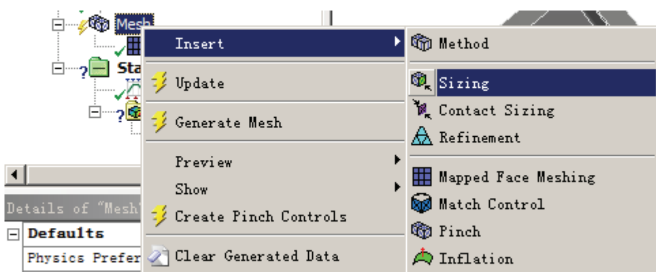


图 11-15 设置体网格

Step4：如图 11-16 所示，在出现的 Details of Sizing 面板中进行如下设置。

选择几何实体，然后在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮，此时 Geometry 栏中将显示 1Body 字样，表示一个几何实体被选中。

在 Element Size 栏中输入网格大小为 5.e-002m。

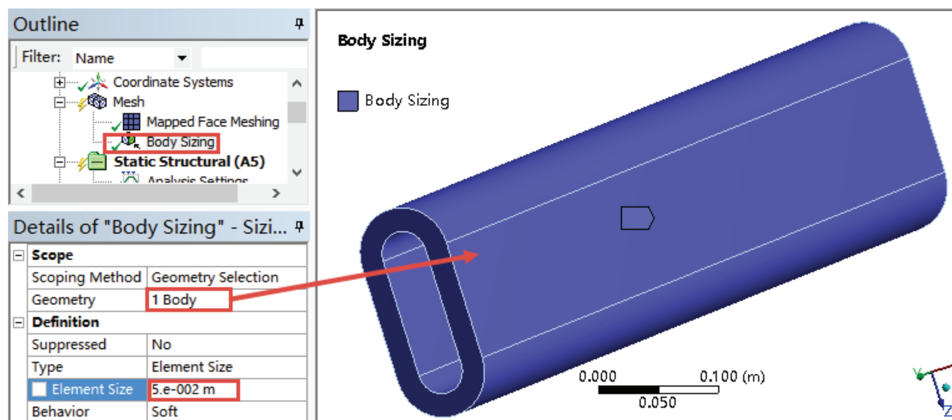


图 11-16 设置体网格

Step5：如图 11-17 所示，右键单击 Mesh 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step6：最终的网格效果如图 11-18 所示。

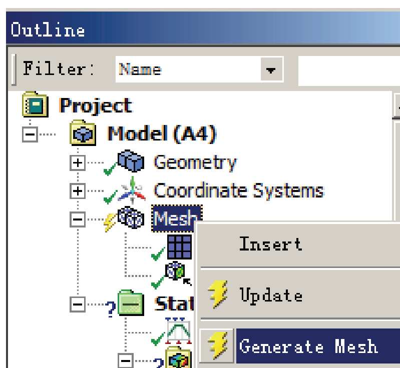


图 11-17 生成网格

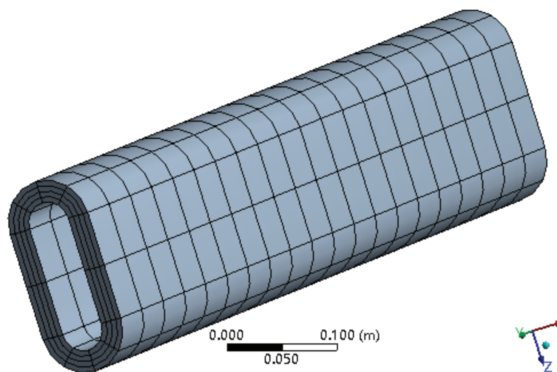


图 11-18 网格效果

11.2.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A5）选项，此时会出现图 11-19 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 11-20 所示。

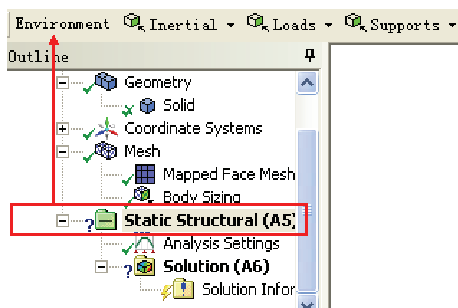


图 11-19 Environment 工具栏

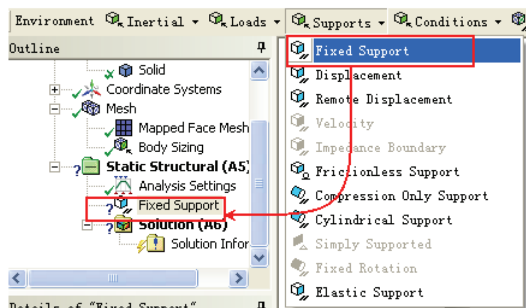


图 11-20 添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，在工具栏中选择后再选择图 11-21 所示的矩形管底面，单击 Details of “Static Structural（A5）”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束。

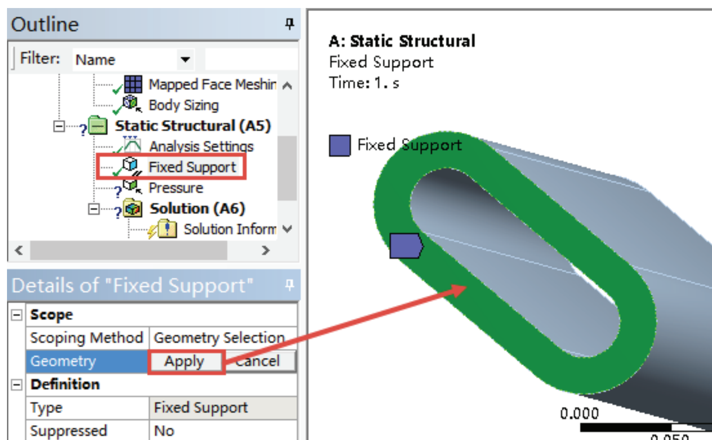


图 11-21 施加固定约束

Step4：如同 Step3，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Pressure（压力）命令，此时在分析树中会出现 Pressure 选项，如图 11-22 所示。

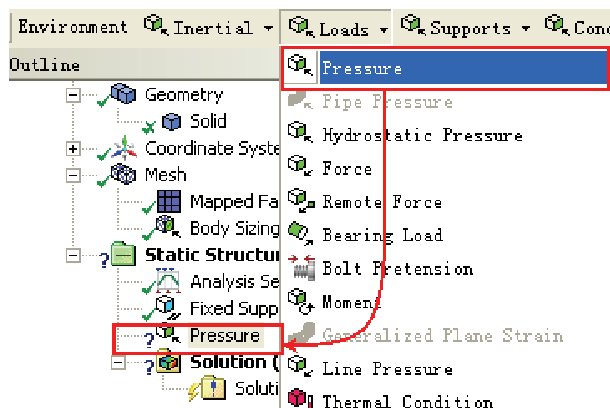


图 11-22 添加压力载荷

Step5：如同 Step3，选中 Pressure，选择钢管上侧面，单击 Details of “Pressure”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，同时在 Define By 的 Magnitude 栏中输入 1.e+006Pa，如图 11-23 所示。

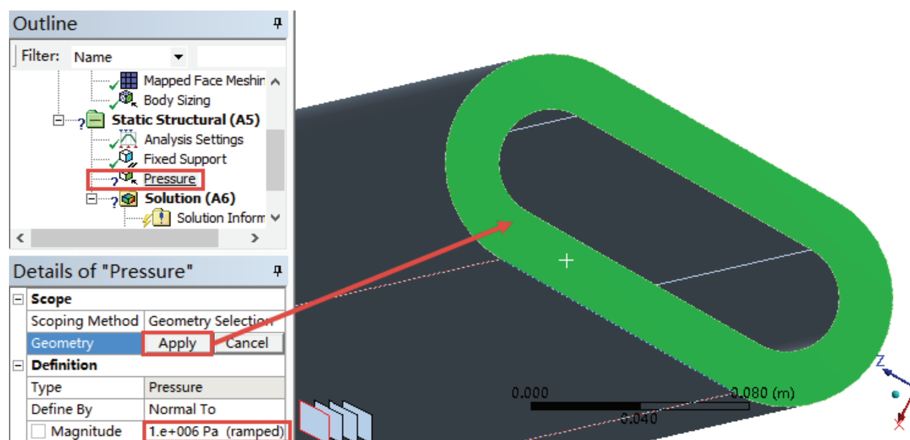


图 11-23　添加面载荷

Step6：在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 11-24 所示。

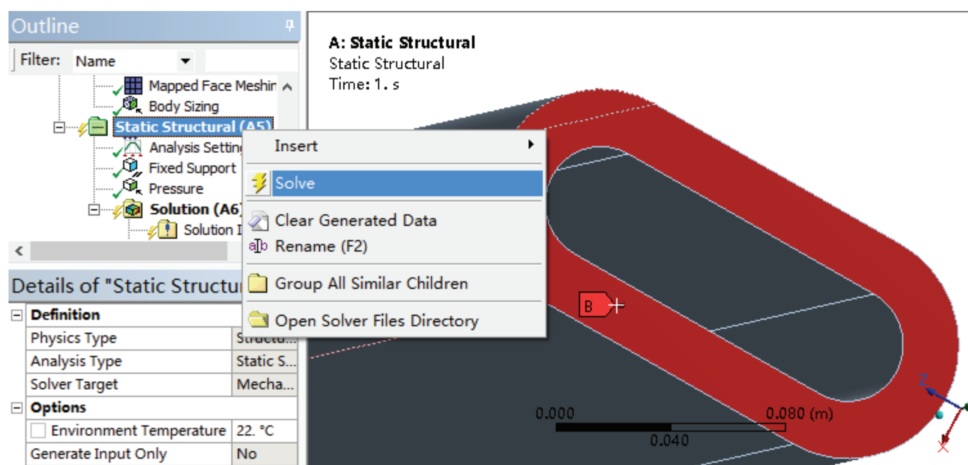


图 11-24　求解

11.2.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 11-25 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-26 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

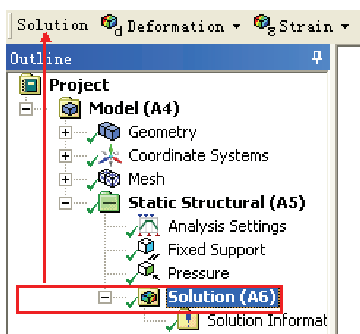


图 11-25 Solution 工具栏

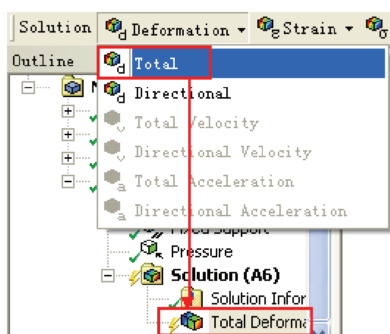


图 11-26 添加等效应力选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Equivalent All Results 命令。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），此时会出现图 11-27 所示的总变形分析云图。

Step5：选择 Solution 工具栏中的 Stress→von Mises 命令，如图 11-28 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项。

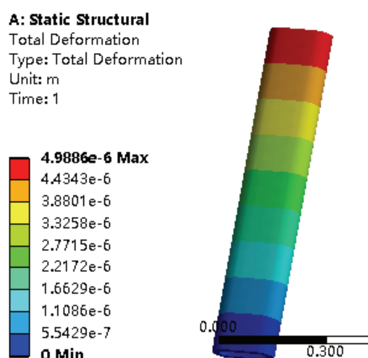


图 11-27 总变形分析云图

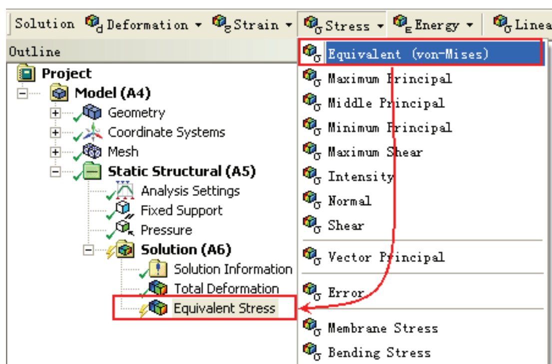


图 11-28 应力分析工具

Step6：同 Step3，在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Equivalent All Results 命令。

Step7：生成图 11-29 所示的应力分析云图。

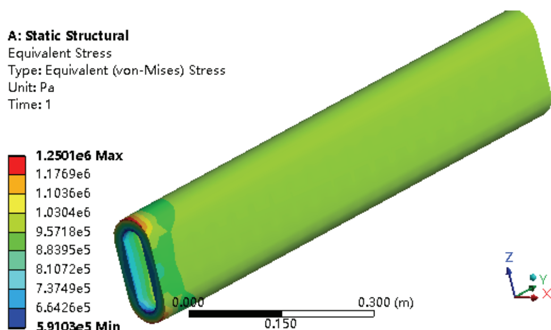


图 11-29 应力分析云图



11.2.9 线性屈曲分析

Step1：如图 11-30 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Linear Buckling（线性屈曲分析）命令直接拖拽到项目 A（静力分析）的 A6Solution 中。

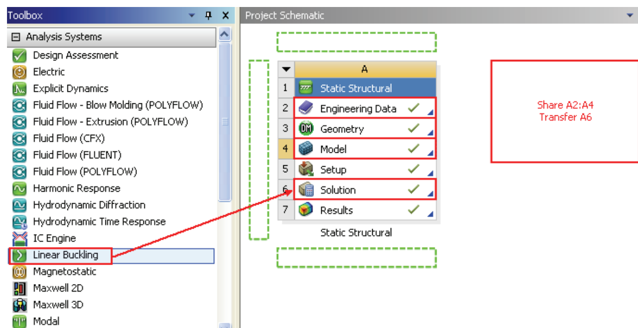


图 11-30 创建线性屈曲分析

Step2：如果 11-31 所示，此时项目 A 的所有前处理数据已经全部导入项目 B 中，此时如果双击项目 B 中的 B5Setup 命令即可直接进入 Mechanical 界面。

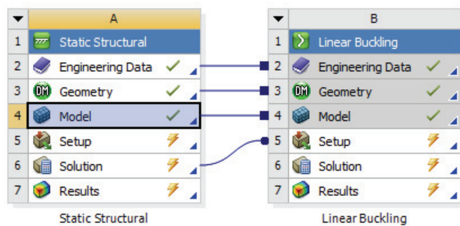


图 11-31 工程数据共享

11.2.10 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B5 栏 Setup 项，进入图 11-32 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

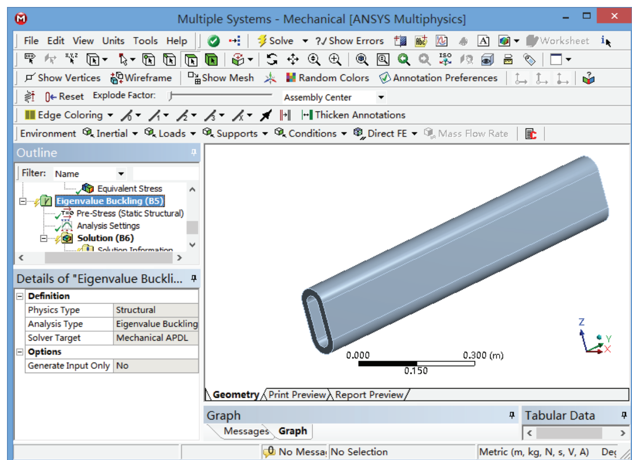


图 11-32 Mechanical 界面

Step2：如图 11-33 所示，在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step3：如图 11-34 所示，单击 Outlines（分析树）中的 Linear Buckling（B5）→Analysis Settings 选项，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”面板的 Options 中进行如下更改。

在 Max Modes to Find 栏中输入 10，表示 10 阶模态将被计算。

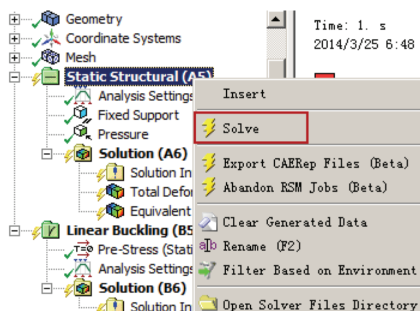


图 11-33 静力计算

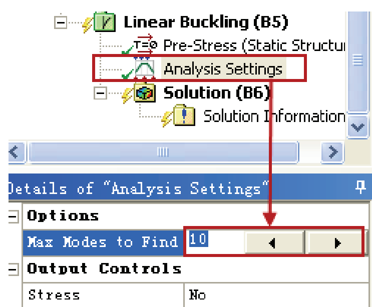


图 11-34 阶数设定

Step4：在 Outlines（分析树）中的 Linear Buckling（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

11.2.11 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（B6）选项，此时会出现图 11-35 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-36 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

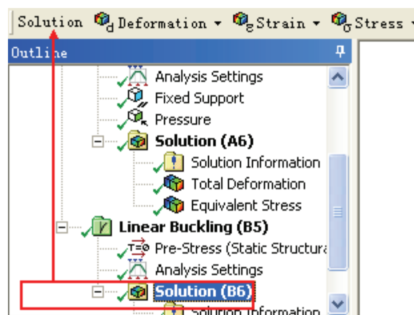


图 11-35 Solution 工具栏

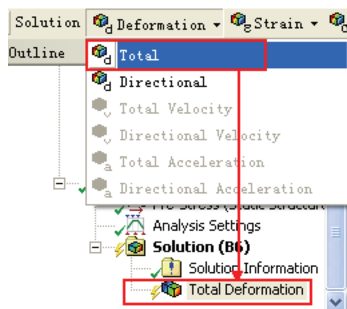


图 11-36 添加变形选项

Step3：选择 Solution 工具栏中的 Total Deformation（总变形）命令，在图 11-37 所示的 Details of“Total Deformation”中 Definition 下的 Mode 中输入 1。

Step4：在图 11-38 所示 Solution（B6）上右键选择 Evaluate All Results 选项，计算完成后的变形如图 11-39 所示。

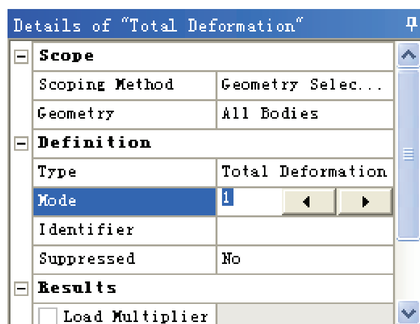


图 11-37　设置频率

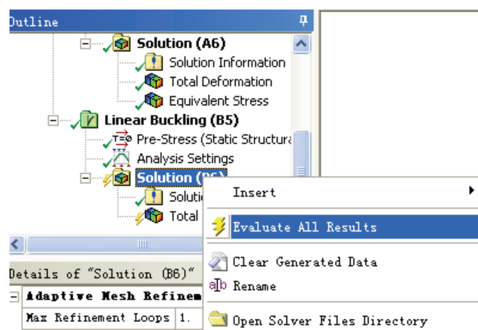


图 11-38　快捷菜单

从左下方的面板中可以查到第一阶屈曲载荷因子为 12797，由于施加载荷为 1MPa，故可知钢管的屈曲压力为 12797×1=12797，变形形状如图 11-39 所示。

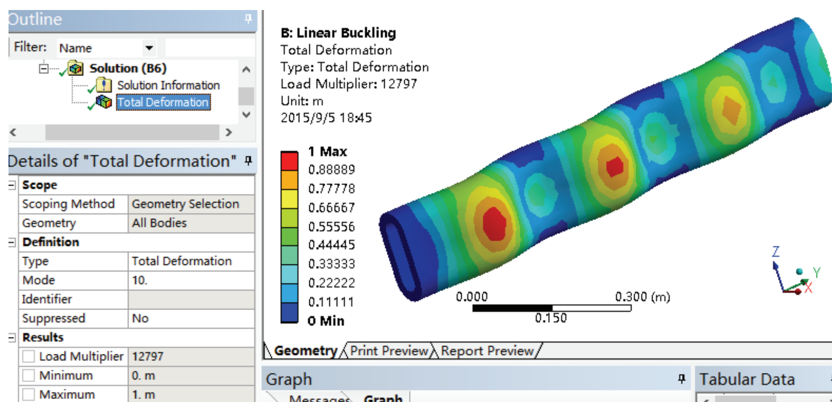
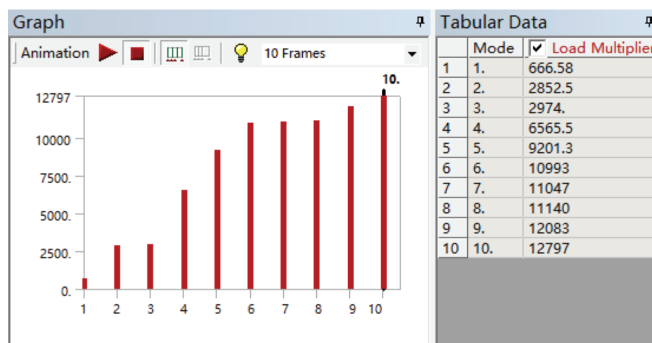


图 11-39　第一阶屈曲模态

第一阶临界载荷为 12797MPa，由于第一阶为屈曲载荷的最低值，因此这意味着在理论上，当压力达到 12797MPa 时结构将失稳。

Step5：图 11-40 和图 11-41 所示为前十阶屈曲模态及阵型。



	Mode	Load Multiplier
1	1.	666.58
2	2.	2852.5
3	3.	2974.
4	4.	6565.5
5	5.	9201.3
6	6.	10993
7	7.	11047
8	8.	11140
9	9.	12083
10	10.	12797

图 11-40　前十阶频率

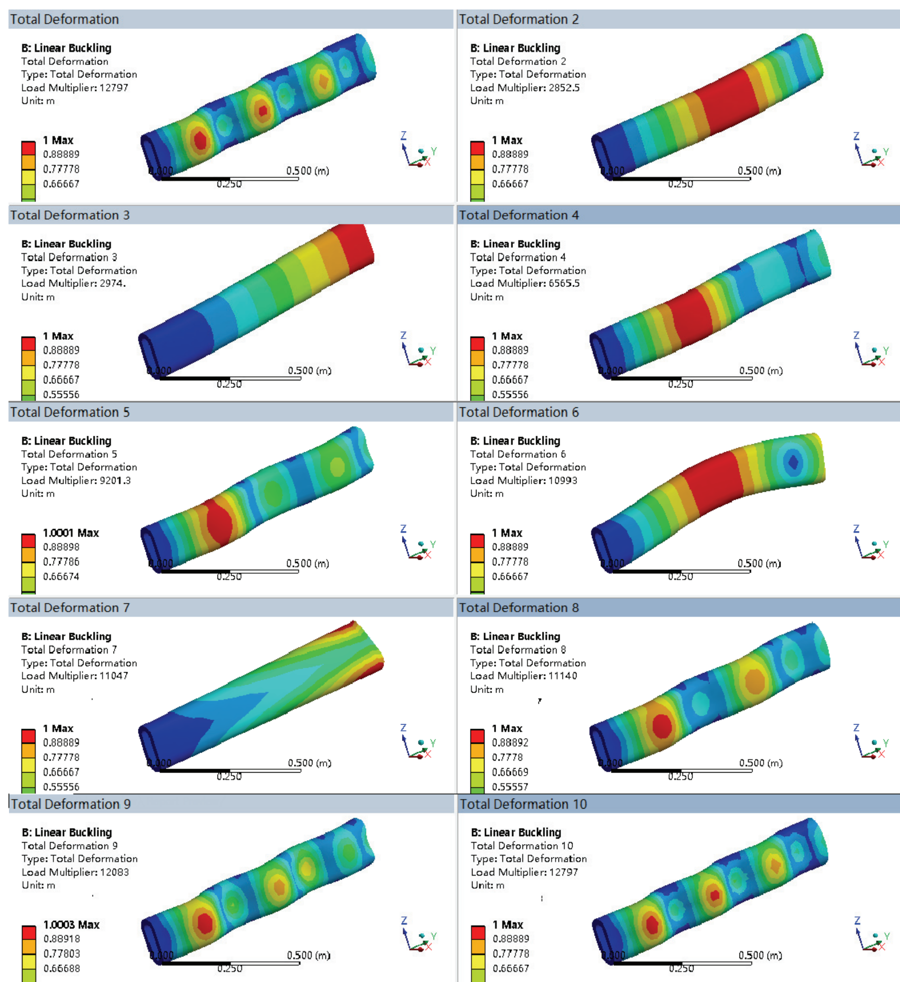


图 11-41 前十阶阵型

11.2.12 保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Pipe_Buckling。

Step3： 单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

11.3 本章小结

本章节详细地介绍了 ANSYS Workbench 16.0 线性屈曲分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定、后处理等操作，同时还简单介绍了临界屈曲载荷的求解方法与载荷因子的计算方法。

通过本章的学习，读者应该对线性屈曲分析的过程有详细的了解。

第 3 篇

第 12 章　显式动力学分析

ANSYS Workbench 16.0 有限元分析平台已经将 LS-DYNA 的显式动力学分析作为一个单独的模块，本章将对 ANSYS Workbench 平台自带的 3 个显式动力学分析模块进行实例讲解，介绍显式动力学分析的一般步骤，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定，后处理操作。

学习目标 / 知识点	了解	理解	应用	实践
显式动力学分析应用	√			
显式动力学分析的意义		√	√	√
LS-DYNA 显式动力学分析		√	√	√
AUTODYN 显式动力学分析			√	√
ANSYS Workbench 显式动力学分析设置			√	√
ANSYS Workbench 材料赋予			√	√
ANSYS Workbench 显式动力学后处理			√	√

12.1　显式动力学分析简介

当数值仿真问题涉及瞬态、大应变、大变形、材料的破坏、材料的完全失效或者伴随复杂接触的结构问题时，通过 ANSYS 显式动力学求解可以满足客户的需求。

ANSYS 显式动力学分析模块包括以下 3 种：Explicit Dynamics、ANSYS AUTODYN 及 Workbench LS-DYNA，此外还有一个显式动力学输出 LS-DYNA 分析模块 Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)。

1．Explicit Dynamics

基于ANSYS AUTODYN分析程序的稳定、成熟的拉格朗日（结构）求解器的 ANSYS Explicit STR 软件已经完成集成到统一的ANSYS Workbench环境中。在 ANSYS Workbench 平台环境中，可以方便、无缝地完成多物理场分析，包括电磁、热、结构和计算流体动力学（CFD）的分析。

ANSYS Explicit STR 扩展了功能强大的ANSYS Mechanical 系列软件分析问题的范围，这些问题往往涉及复杂的载荷工况、复杂的接触方式，比如：

- 抗冲击设计、跌落试验（电子和消费产品）。
- 低速-高速的碰撞问题分析（从运动器件分析到航空航天应用）。
- 高度非线性塑性变形分析（制造加工）。

■ 复杂材料失效分析应用（国防和安全应用）。

■ 破坏接触，如胶粘或焊接（电子和汽车工业）。

2．ANSYS AUTODYN

ANSYS AUTODYN 软件是一个功能强大的用来解决固体、流体、气体以及相互作用的高度非线性动力学问题的显式分析模块。该软件不仅计算稳健、使用方便，而且还提供了很多高级功能。

与其他显式动力学软件相比，ANSYS AUTODYN 软件具有易学、易用、直观、方便、交互式图形界面的特性。

采用 ANSYS AUTODYN 进行仿真分析可以大大降低工作量，提高工作效率和降低劳动成本。通过自动定义接触和流固耦合界面，以及默认的参数可以大大节约时间和降低工作量。

ANSYS AUTODYN 提供了如下求解技术。

■ 有限元法，用于计算结构动力学（FE）。

■ 有限体积法，用于快速瞬态计算流体动力学（CFD）。

■ 无网格粒子法，用于高速、大变形和碎裂（SPH）。

■ 多求解器耦合，用于多种物理现象耦合情况下的求解。

■ 丰富的材料模型，包括材料本构响应和热力学计算。

■ 串行计算和共享内存式和分布式并行计算。

ANSYS Workbench 平台提供了一个有效的仿真驱动产品开发环境。

■ CAD 双向驱动。

■ 显式分析网格的自动生成。

■ 自动接触面探测。

■ 参数驱动优化。

■ 仿真计算报告的全面生成。

■ 通过 ANSYS DesignModeler 实现几何建模、修复和清理。

3．ANSYS LS-DYNA

ANSYS LS-DYNA 软件为功能成熟、输入要求复杂的程序，提供了方便、实用的接口技术来连接有多年应用实践的显式动力学求解器。

在经典的 ANSYS 参数化设计语言（APDL）环境中，ANSYS Mechanical 软件的用户早已可以进行显式分析求解。

最近，采用 ANSYS Workbench 强大和完整的 CAD 双向驱动工具、几何清理工具、自动划分与丰富的网格划分工具来完成 ANSYS LS-DYNA 分析中初始条件、边界条件的方便快速定义。

显式动力学计算充分利用 ANSYS Workbench 功能特点生成 ANSYS LS-DYNA 求解计算用的关键字输入文件（.k），另外安装程序中包含 LS-PrePost，提供对显式动力学仿真结果进行专业的后处理功能。

12.2 显式动力学分析实例——钢球撞击金属网分析

本案例主要对 Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）模块进行实例讲解，计算一个空心

钢球撞击金属网的一般步骤。

学习目的：熟练掌握 Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）显式动力学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\char12\char12-1\Model_Ly.agdb
结果文件	网盘\char12\char12-1\Impicit.wbpj

12.2.1 问题描述

如图 12-1 所示模型，用 Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）来分析撞击的过程模拟。

12.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 12-2 所示。

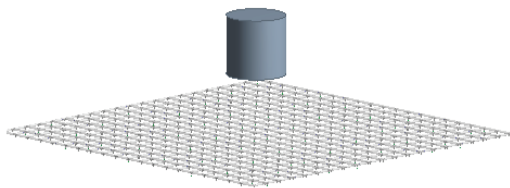


图 12-1　模型

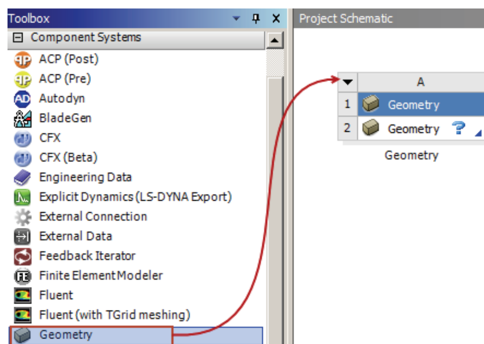


图 12-2　创建项目 A

Step3：右键单击项目 A 中的 A2，在弹出的图 12-3 所示的快捷菜单中依次选择 Import Geometry→Browse 命令。

Step4：在弹出的图 12-4 所示的“打开”对话框中选择文件路径，导入 Model_Ly.agdb 几何体文件，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

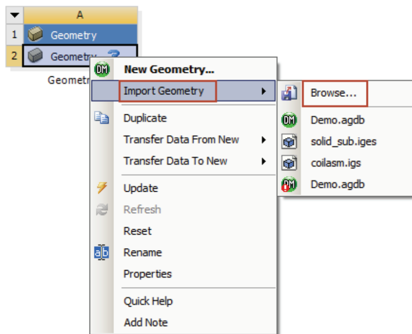


图 12-3　快捷菜单

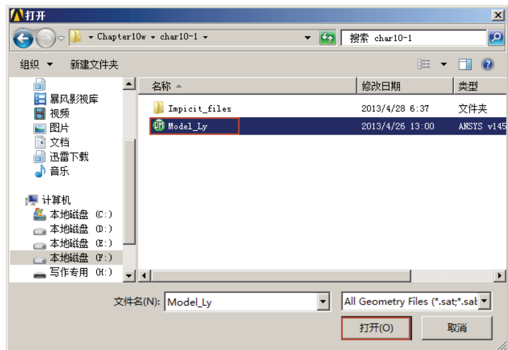


图 12-4　读入几何文件

Step5：拖动 Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）显式动力学分析模块到工程管理窗口，如图 12-5 所示。

Step6：此时，Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）模块成功被添加到了工程管理窗口中，如图 12-6 所示。

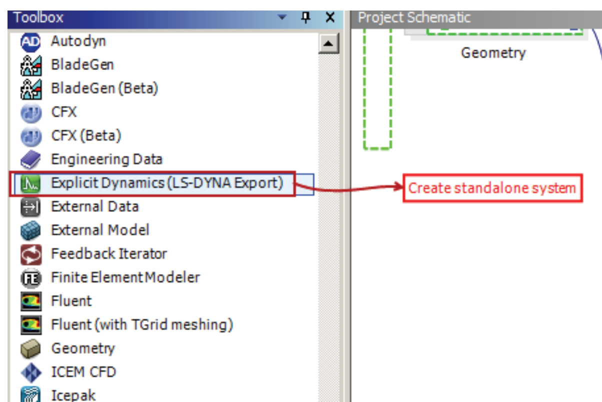


图 12-5　添加分析

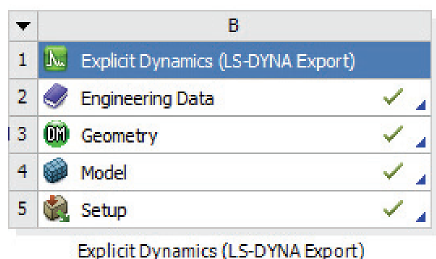


图 12-6　分析项目

12.2.3 启动 Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)建立项目

Step1：将 A 中的 A2 直接拖拽到项目 B 的 A2 栏中，如图 12-7 所示。

Step2：此时建立了 Workbench LS-DYNA 分析流程表，如图 12-8 所示。

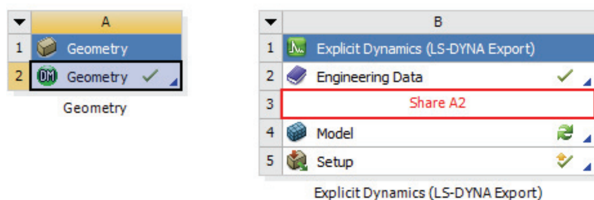


图 12-7　创建项目 B

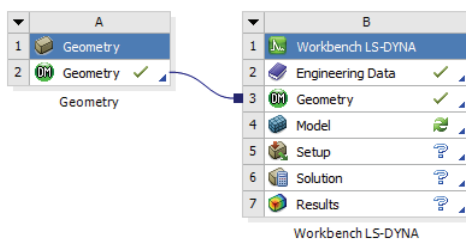


图 12-8　分析流程表

12.2.4 材料选择与赋予

Step1：双击项目 B 中的 B2（Engineering Data）工程数据，在弹出的工程数据管理器的工具栏中单击按钮，如图 12-9 所示，在 Engineering Data Sources（工程数据源）中选择 General Materials（通用材料库），然后单击 Outline of General Materials（通用材料列表）中 Aluminum Alloy 和 Structural Steel 两种材料后面的按钮，选中两种材料。

注：如果材料被选中，则在响应的材料名称后面出现一个的图标。

Step2：单击工具栏中的 Return to Project 按钮退出材料库。

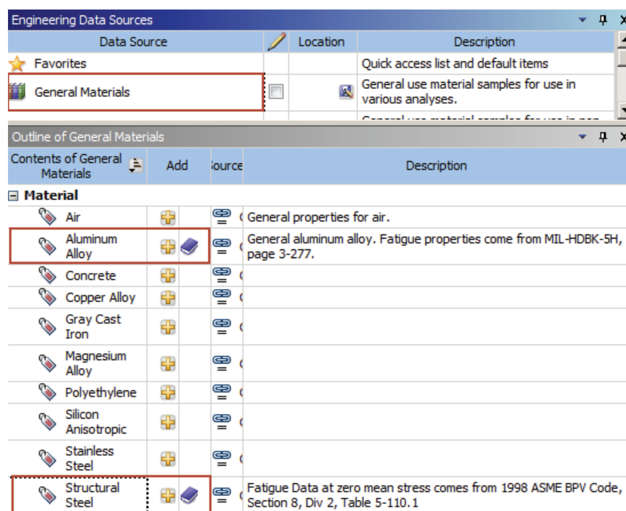


图 12-9　材料选择

12.2.5 建立项目分析

Step1：双击项目 B 中的 B4（Mesh）项，进入图 12-10 所示的 Mechanical 平台，在该界面下即可进行材料赋予、网格划分，模型计算与后处理等工作。

在 Workbench LS-DYNA 的 Mechanical 分析平台中，可以看到添加一些 LS-DYNA 专用的程序命令。

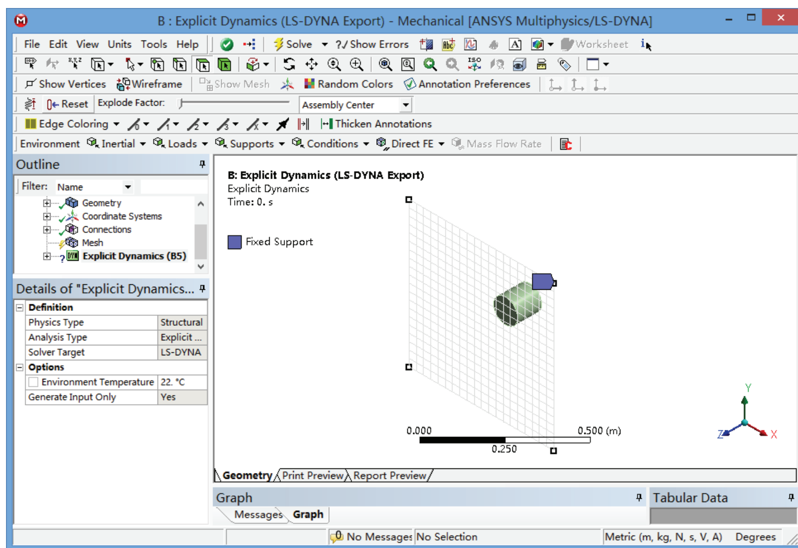


图 12-10　Mechanical 平台

Step2：如图 12-11 所示，在 Outline 中单击 Model（B4）→Geometry→Line Body，在 Details of “Line Body”面板中的 Material→Assignment 中选择 Aluminum Alloy 材料。

Step3：如图 12-12 所示，按上述步骤将 Structural Steel 材料赋予 Solid 几何。

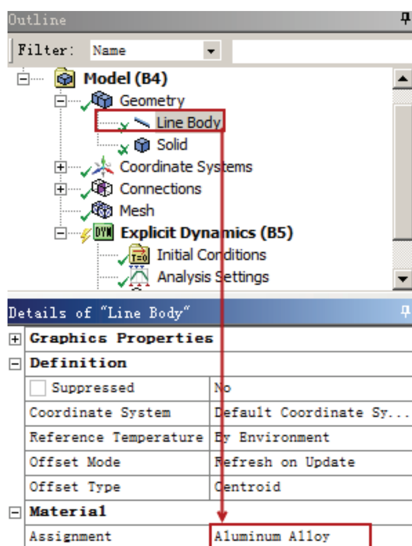


图 12-11　选择材料

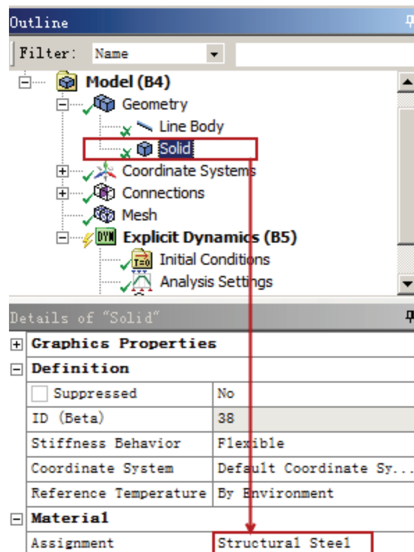


图 12-12　材料赋予

12.2.6 分析前处理

Step1： 如图 12-13 所示，两个几何实体已经被程序自动设置好连接，本算例按默认即可。

Step2： 在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，进行网格划分，划分完成后的网格效果如图 12-14 所示。

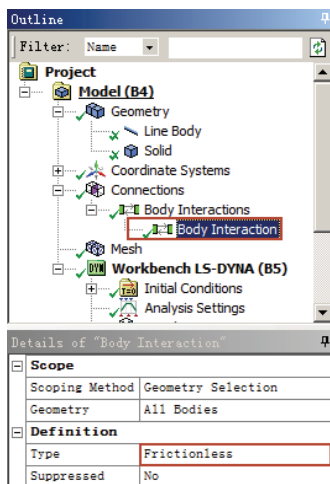


图 12-13　接触设置

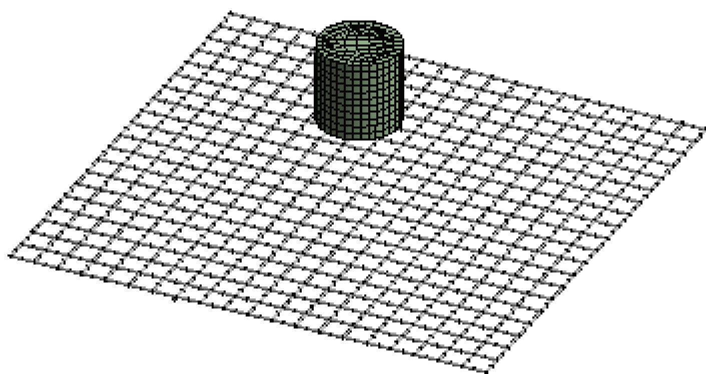


图 12-14　网格划分效果

12.2.7 施加载荷

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Workbench LS-DYNA（B5）→

Initial Conditions 选项，此时会出现图 12-15 所示的 Initial Conditions 工具栏。

Step2：选择 Initial Conditions 工具栏中的 Velocity（速度）命令，此时在分析树中会出现 Velocity 选项，如图 12-16 所示。

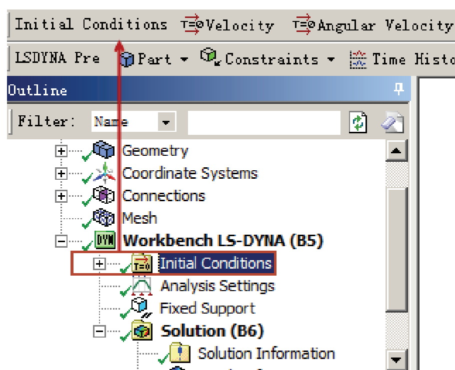


图 12-15　Initial Conditions 工具栏

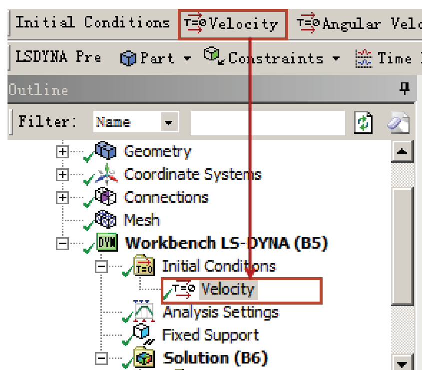


图 12-16　添加速度

Step3：单击工具栏中的（选择体）按钮，选择球几何模型，在 Details of“Velocity”中做如下设置。

单击 Geometry 选项下的 Apply 按钮。

在 Define By 栏中选择 Components 选项。

在 X Component 与 Y Component 栏中输入 0m/s，在 Z Component 栏中输入 200m/s，如图 12-17 所示。

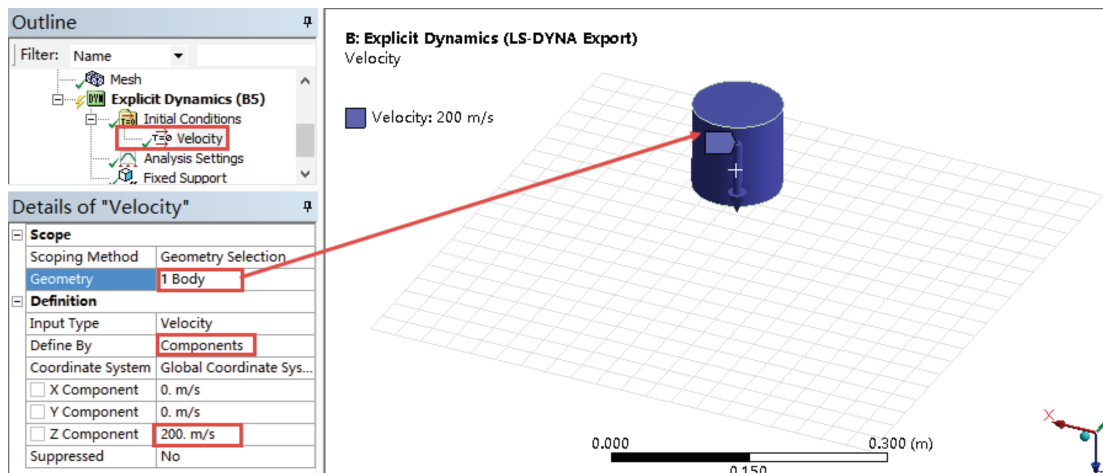


图 12-17　施加速度载荷

Step4：单击 Explicit Dynamics (B5)→Analysis Settings，在出现的 Details of“Analysis Settings”操作面板中的 End Time 栏中输入 5e-2，其他保持默认即可。

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Workbench LS-DYNA（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中单击图 12-18 所示的 Fixed Support 命令。

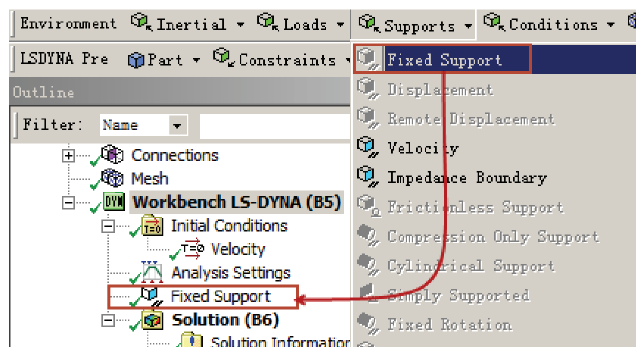


图 12-18 添加约束命令

Step6： 单击工具栏中的（选择点）按钮，然后选择钢网四周的节点（共有 81 个），操作如图 12-19 所示。

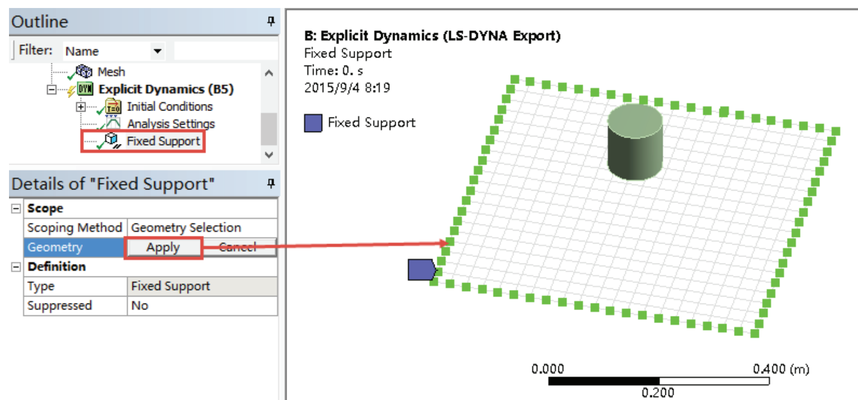


图 12-19 设置约束

Step7： 在 Outlines（分析树）中的 Explicit Dynamics（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，开始计算，如图 12-20 所示。

Step8： 经过一段时间的处理，在信息窗口中显示图 12-21 所示的信息，此信息表明成功创建 LS-DYNA 计算用的.k 格式的文件。

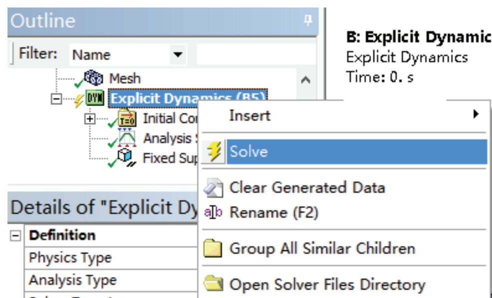


图 12-20 求解

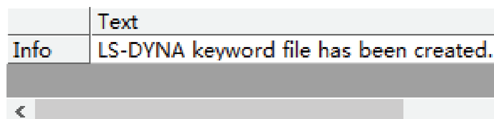


图 12-21 提示信息

12.2.8 启动 LS-DYNA 程序

Step1：依次选择开始菜单中的 ANSYS16.0→Mechanical APDL Product Launcher 16.0，此时将启动 ANSYS APDL 求解器过滤窗口，在窗口中进行如下设置，如图 12-22 所示。

在 Simulation Environment 选项中选择 LS-DYNA Solver 选项。

在 Analysis Type 选项中选择 Typical LS-DYNA Analysis 选项。

在 License 栏中选择 ANSYS Multiphysics /LS-DYNA 选项。

在 Working Directory 地址栏中找到刚才创建的.k 文件的目录。

注：一般启动程序会自动找到当前的目录（在 Workbench 项目目录的 Mech 文件夹中）。

单击 Keyword input File 后面的 Browse 按钮，在弹出的选择*.k 对话框中选择 LSDYNAexport.k 文件，并单击“打开”按钮。

最后单击 Run 按钮进行计算。

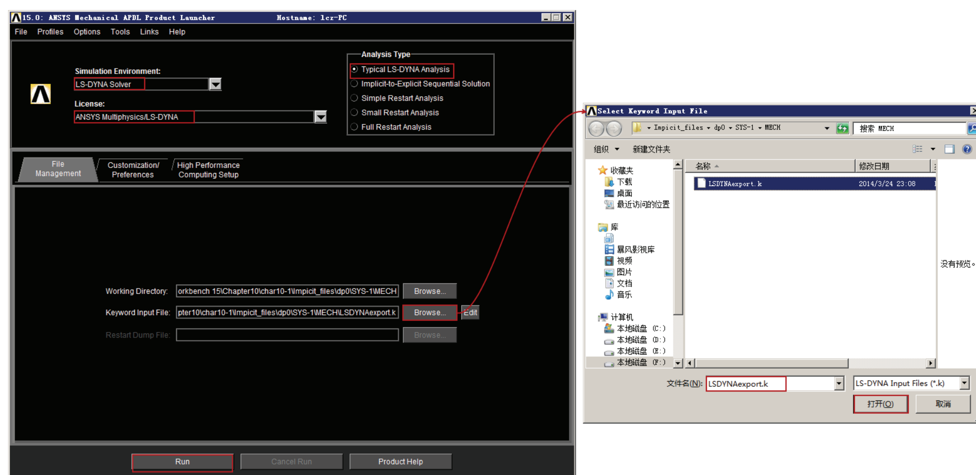


图 12-22　LS-DYNA 求解器设置

Step2：此时将弹出计算界面如图 12-23 所示。

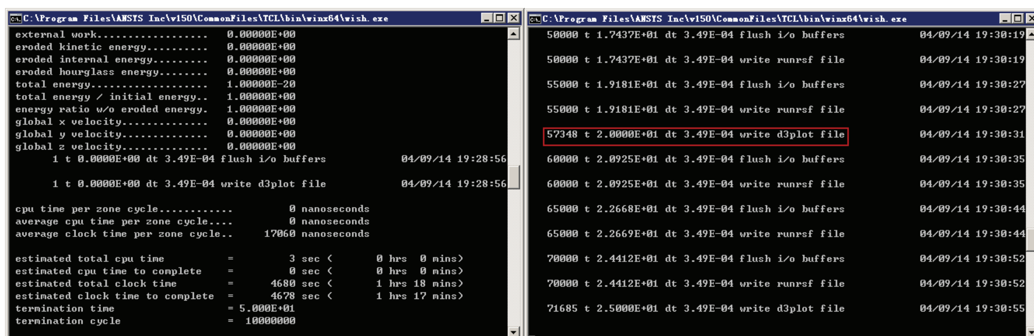


图 12-23　LS-DYNA 计算界面

在计算过程监控界面中读者可以实时观看到求解的步骤，这里不详细介绍，请感兴趣的读者参考帮助文档进行学习。

Step3： 计算完成后将出现图 12-24 所示，当出现 Normal termination 信息表示求解正常结束，按任意键关闭计算进程。

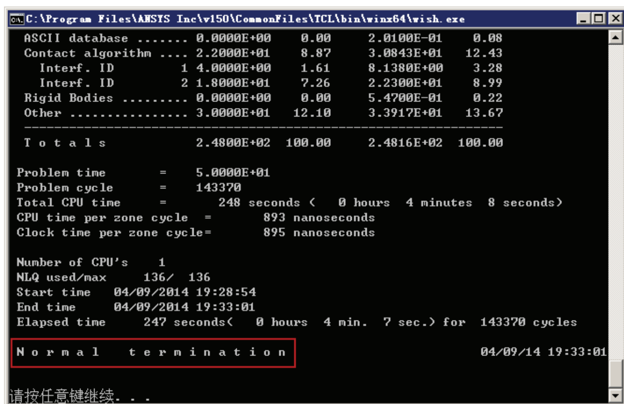


图 12-24　LS-DYNA 完成

12.2.9 Autodyn 计算

Step1： 双击 Toolbox→Component System→Autodyn 选项，此时在相关管理窗口中出现图 12-25 所示项目 C。

Step2： 双击项目 C 中的 C1（Autodyn）栏，进入图 12-26 所示的 Autodyn 平台。

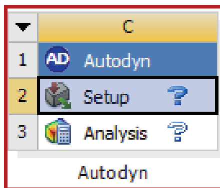


图 12-25　Solution 工具栏

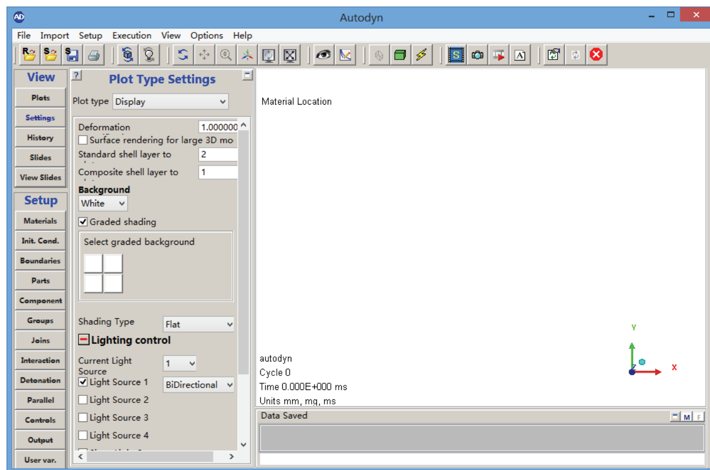


图 12-26　进入 Autodyn 平台

Step3： 选择菜单 Import→from LS-DYNA（.k）选项，在弹出的图 12-27 所示的对话框中选择 LSDYNAexport.k 文件，并单击“打开”按钮。

Step4： 在弹出的图 12-28 所示窗口中选中前两项并单击 √ 按钮。

Step5： 经过一段时间的数据导入，绘图窗口中将显示图 12-29 所示图形。



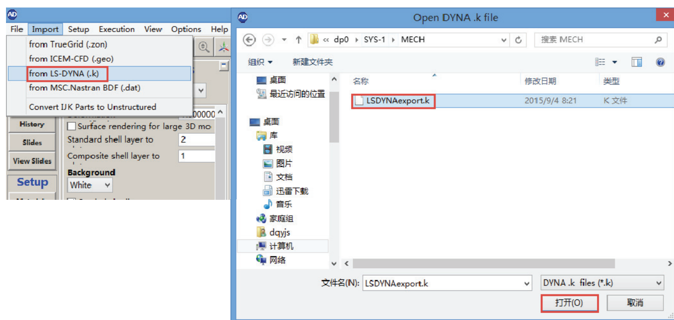


图 12-27　导入文件

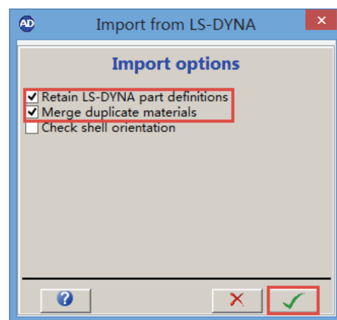


图 12-28　设置

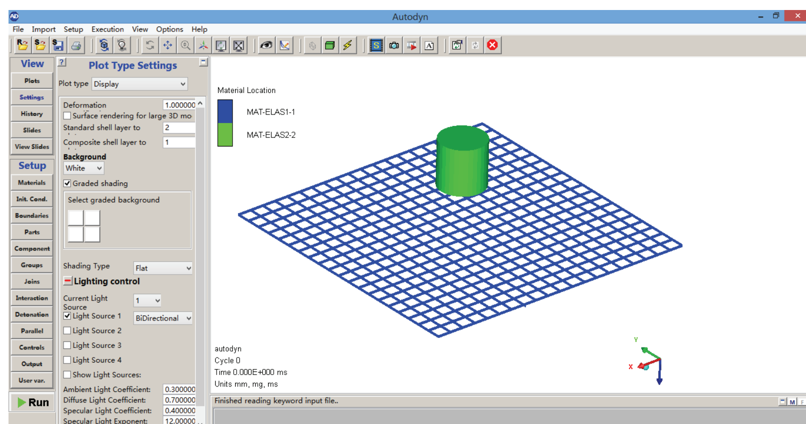


图 12-29　几何

Step6：单击 Materials，在出现的图 12-30 所示的对话框中进行如下设置。

选择 MAT-ELAS1-1 选项，单击 Modify 按钮，在弹出的 Material Data Input 对话框中将材料名成改为 zhu，单击 √ 按钮。

Step7：同样操作，在图 12-31 所示的对话框中进行如下设置。

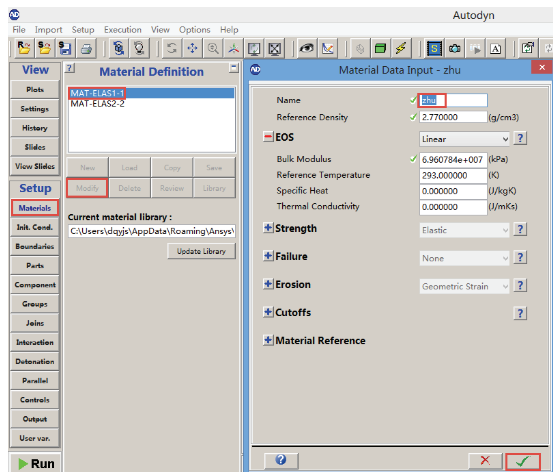


图 12-30　重命名 1

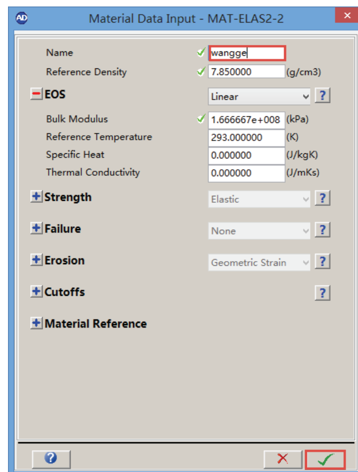


图 12-31　重命名 2

选择 MAT-ELAS2-2，单击 Modify 按钮，在弹出的 Material Data Input 对话框中将材料名成改为 wangge，单击 √ 按钮。

Step8：如图 12-32 所示，单击 Interaction 命令，在出现的 Interactions 详细设置窗口中进行如下设置。

单击 Lagrange/Lagrange 按钮。

在 Type 栏中选择 External Gap 选项。

单击 Calculate 按钮及 Check 按钮，此时 Gap size 栏将显示 0.252525。

Step9：如图 12-33 所示，在导航栏中单击 Controls 命令，在出现的 Define Solution Controls 详细设置窗口中进行如下设置。

在 Cycle limit 栏中输入 10000000。

在 Time limite 栏中输入 0.15。

在 Energy fraction 栏中输入 0.05。

在 Energy ref. cycle 栏中输入 10000000。

Step10：如图 12-34 所示，在导航栏中单击 Output 命令，在出现的 Define Output 详细设置窗口中进行如下设置。

选择 Time 选项。

在 End Time 栏中输入 0.15。

在 Increment 栏中输入 0.05。

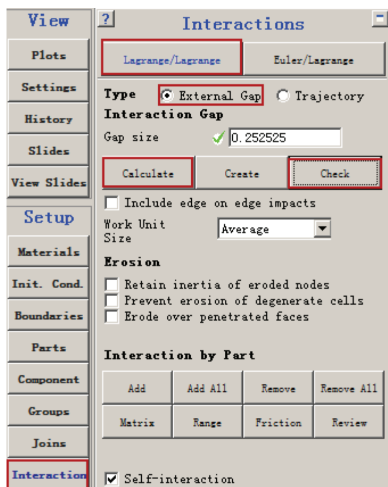


图 12-32　接触设置

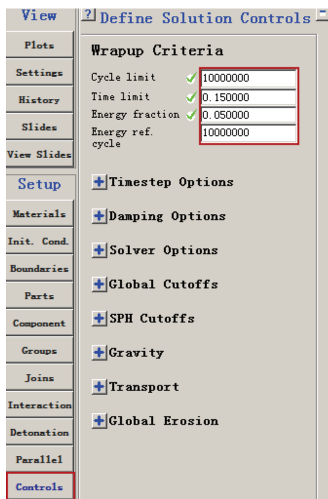


图 12-33　求解设置

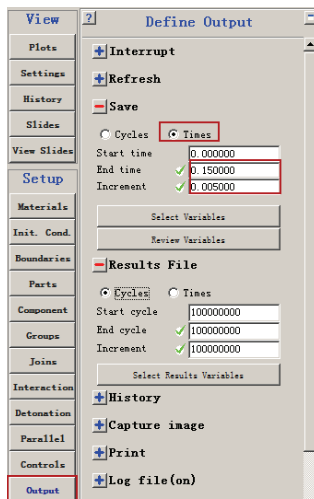


图 12-34　输出设置

Step11：在导航栏中单击 RUN 命令即可进行计算，计算完成后保存文件为 Implicit。

12.2.10 问题解读

本算例讲解了如何将.k 格式的文件导入到 LS-DYNA 和 Autodyn 中进行计算，并未对计算结果进行分析，请读者自行分析。



12.3 显式动力学分析实例——金属块穿透钢板分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的显式动力学分析模块，计算金属块冲击钢板时钢板的受力情况。

学习目的：熟练掌握 ANSYS Workbench 显示动力学分析的方法及过程。熟练掌握在 SpaceClaim 软件中建模的方法。

模型文件	网盘\char12\char12-2\chongji.stp
结果文件	网盘\char12\char12-2\autodyn_ex.wbpj

12.3.1 问题描述

如图 12-35 所示板型材和模具几何模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算板型材被模具挤压成型的过程。

注意：SpaceClaim 软件中建模需要单独的模块支持，几何模型文件已经保存为 stp 格式。

12.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Explicit Dynamic（显式动力学分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 12-36 所示。

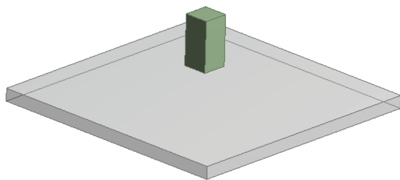


图 12-35 几何模型

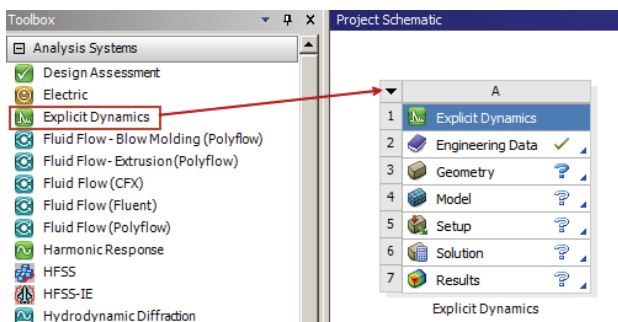


图 12-36 创建分析项目 A

12.3.3 绘制几何模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 12-37 所示。

Step2：此时启动图 12-38 所示的“打开”对话框，在对话框中选择 Geo.x_t 几何文件。

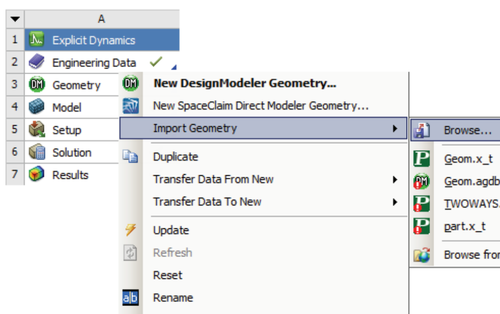


图 12-37 快捷菜单几何体

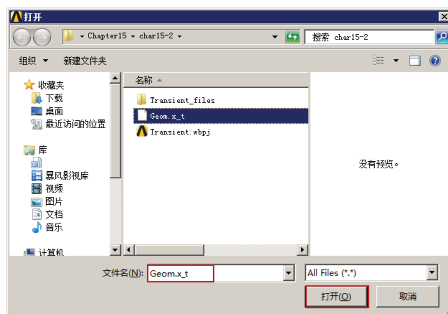


图 12-38 对话框

Step3：双击 A3 进入 DM 平台，如图 12-39 所示，退出建模平台。

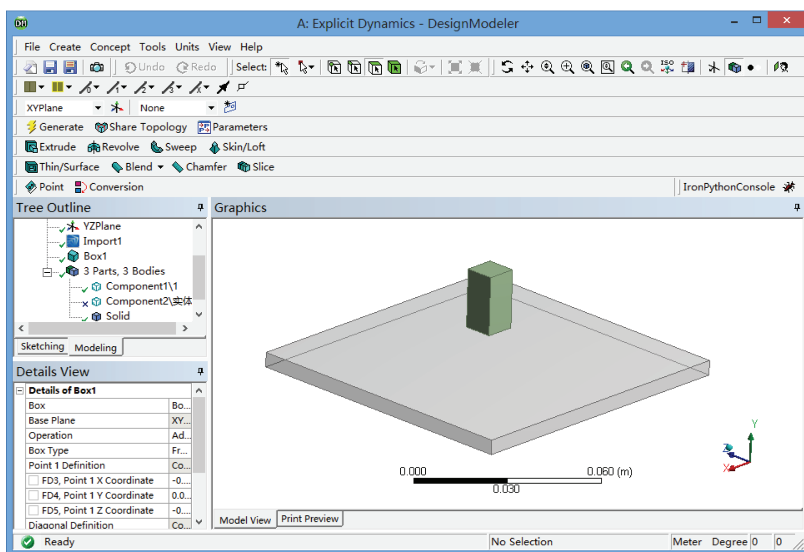


图 12-39 进入 DM 平台

12.3.4 添加材料方法

Step1：双击 Component Systems 中的 Engineering Data 选项，此时在 Project Schematic 项目管理窗口中出现图 12-40 所示的材料库选项。

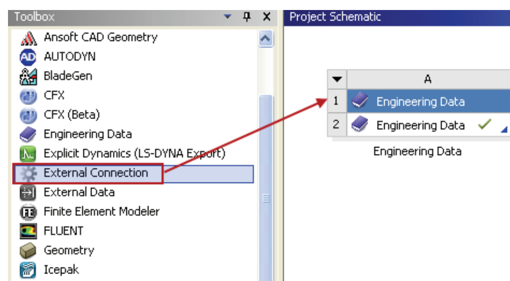


图 12-40 材料库选项

Step2：双击 A2（Engineering Data）工程数据，进入工程数据设置窗口，单击工具栏中的按钮进入工程数据库，此时默认的工程数据库如图 12-41 所示，这些数据库被用于各种类型计算时使用。

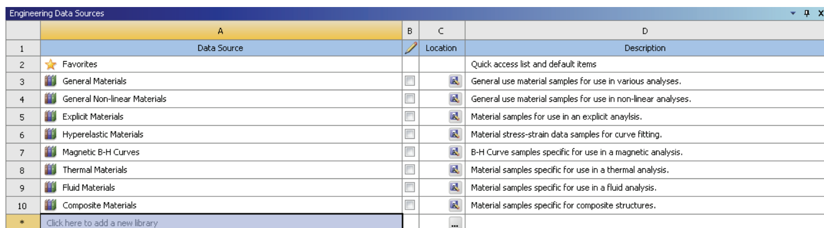


图 12-41　工程数据库

Step3：单击 Engineering Data Source（工程数据源）中最后一行 C 列中的按钮，如图 12-42 所示。

Step4：此时弹出图 12-43 所示的“打开”对话框，在对话框中选择 nCode_matml 选项，并单击“打开”按钮。

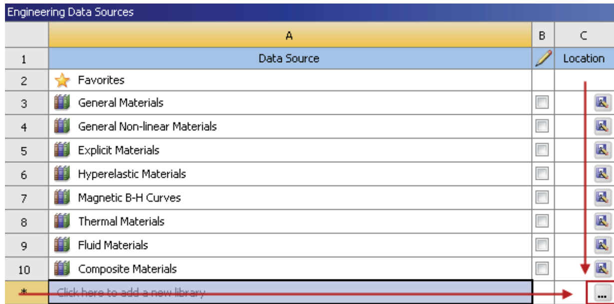


图 12-42　工程数据添加按钮

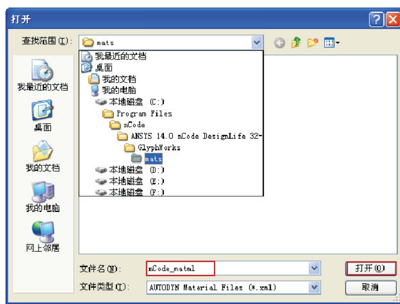


图 12-43　选择工程数据文件

Step5：此时单击 Engineering Data Source 中的 A11（nCode_matml），将出现图 12-44 所示材料库。

以上步骤为 nCode 自带材料添加到 Workbench 平台中的方法，ANSYS ACP 自带材料库的添加方法与上述过程相似，材料库文件的地址如图 12-45 所示。

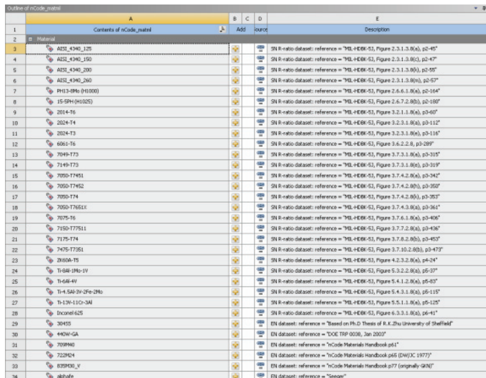


图 12-44　nCode 材料库

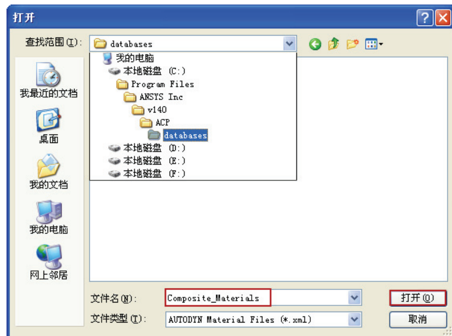


图 12-45　ANSYS ACP 材料库

12.3.5 添加材料

Step1： 双击项目 A 中的 A2（Engineering Data），此时会出现图 12-46 所示的材料列表。

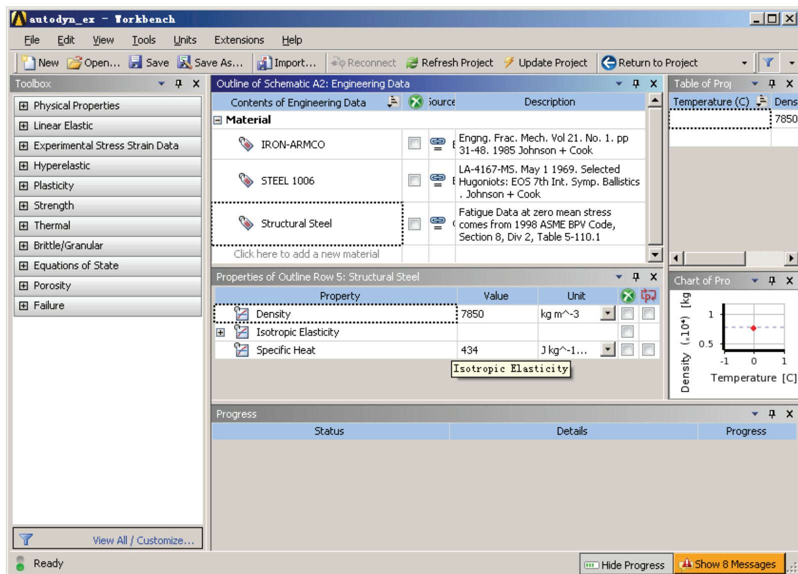


图 12-46　材料列表

Step2： 单击工具栏中的▦按钮，进入图 12-47 所示的材料库，在材料库中列举了应用与不同领域及分析方向的材料库，其中部分材料需要单独添加，添加材料方法如下。

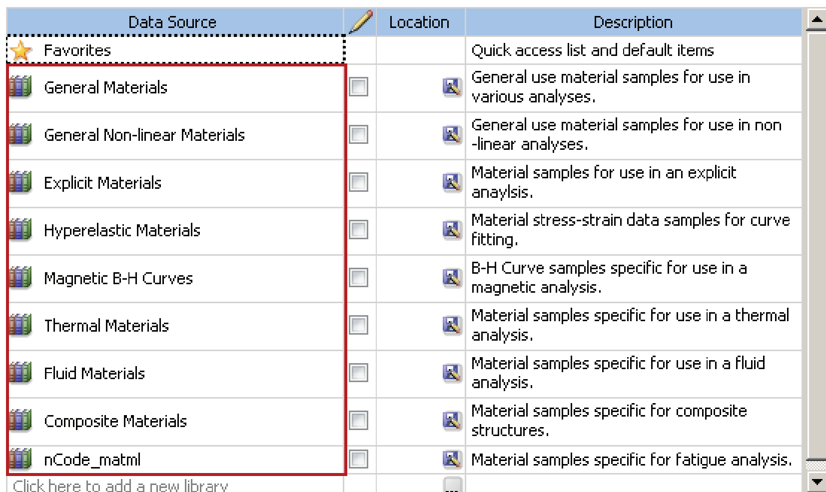


图 12-47　材料库

Step3： 如图 12-48 所示，在材料库中选择 Explicit Material（显式分析材料库），在 Outline of Explicit Materials 中选择 STEEL 1006 和 IRON-ARMCO 两种材料。



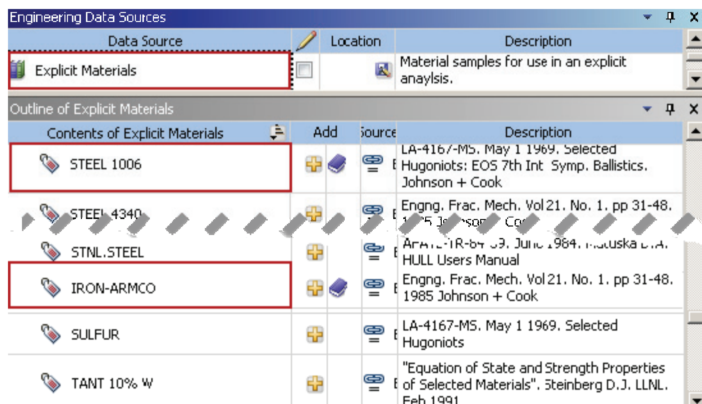


图 12-48 选择材料

Step4： 选择完成后，单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回 Workbench 主界面。

12.3.6 显式动力学分析前处理

Step1： 双击项目 A 中的 A4（Model），此时会出现 Mechanical 界面。

Step2： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Geometry→Component1\1 选项，在图 12-49 所示的 Details of Component1\1 面板中进行如下设置。

在 Stiffness Behavior 选项中选择 Flexible 选项（默认即可）。

在 Material→Assignment 中选择 STEEL 1006 材料。

同样操作设置 solid 为 IRON-ARMCO，如图 12-50 所示。

在 Stiffness Behavior 选项中选择 Rigid 选项。

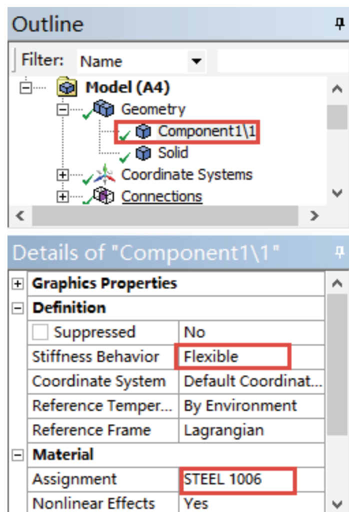


图 12-49 材料设置

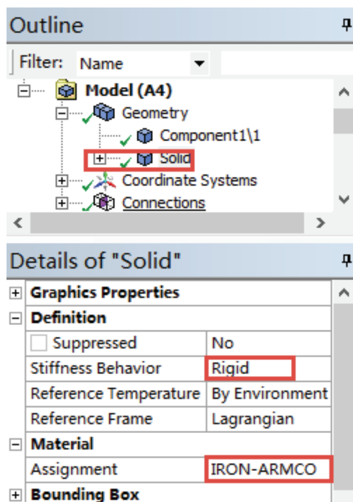


图 12-50 材料设置

Step3： 右键单击 Mesh，在弹出的快捷菜单中选择 Generate 命令，划分网格。

Step4： 图 12-51 所示为划分好的网格模型。

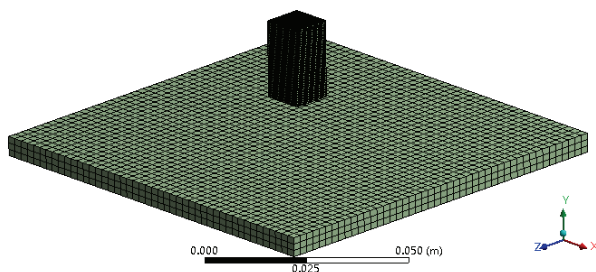


图 12-51　网格划分效果

12.3.7 施加约束

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamic（A5）选项，此时会出现图 12-52 所示的 Environment 工具栏。

Step2： 选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 12-53 所示。

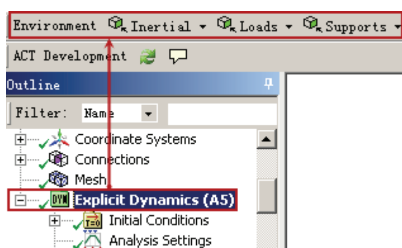


图 12-52　Environment 工具栏

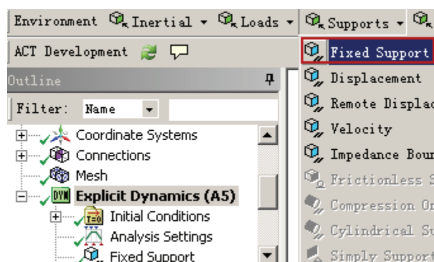


图 12-53　添加固定约束

Step3： 单击工具栏中的 （选择线条）按钮，选择 Component1\1 几何的所有线条，如图 12-54 所示，单击 Details of "Fixed Support" 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中线条上施加固定约束。

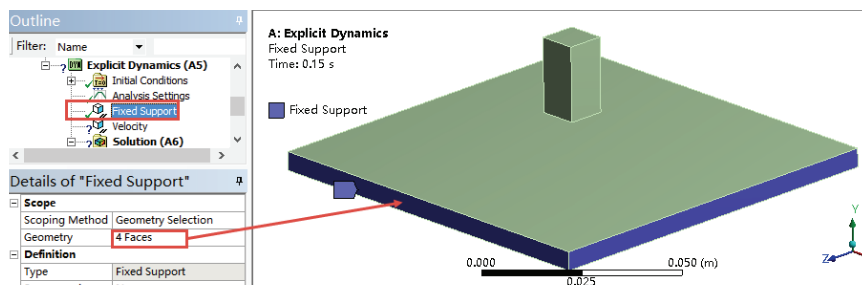


图 12-54　施加固定约束

Step4： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamic（A5）选项，此时会出现图 12-55 所示的 Environment 工具栏。

Step5： 选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Velocity（速度）命令，此时在

分析树中会出现 Velocity 选项，如图 12-56 所示。

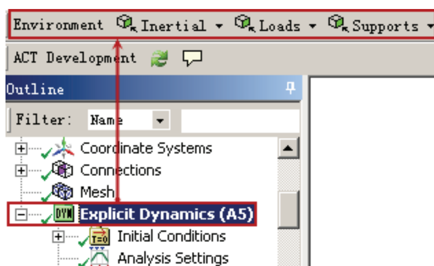


图 12-55　Environment 工具栏

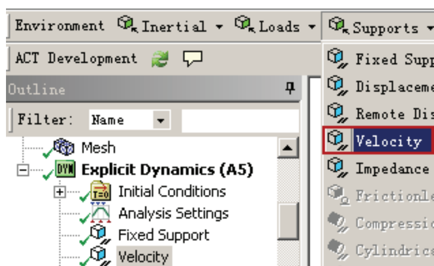


图 12-56　速度约束

Step6：单击工具栏中的（选择实体）按钮，选择 Component2\2 几何实体，如图 12-57 所示，单击 Details of “Velocity” 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Y Component 栏中输入位移量为-300m/s，即可在选中实体上施加速度约束。

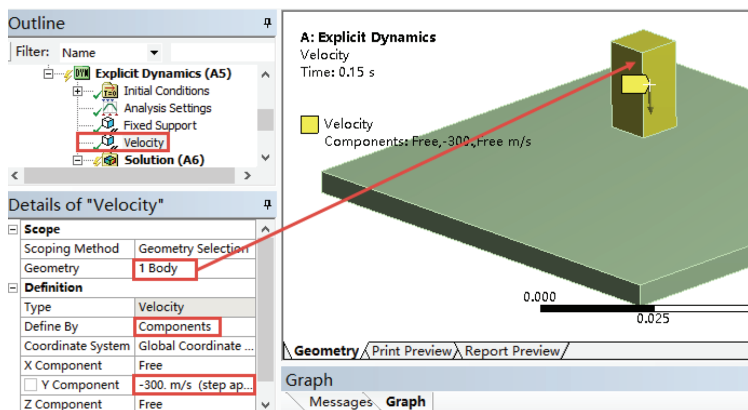


图 12-57　施加速度约束

Step7：单击 Outlines（分析树）中的 Explicit Dynamic（A5）→Analysis Settings，如图 12-58 所示，在 Details of “Analysis Settings” 面板中的 End Time 中输入截止时间为 0. 15s。

在 Maximum Number of Cycles 栏中输入 10000，其余保持默认即可。

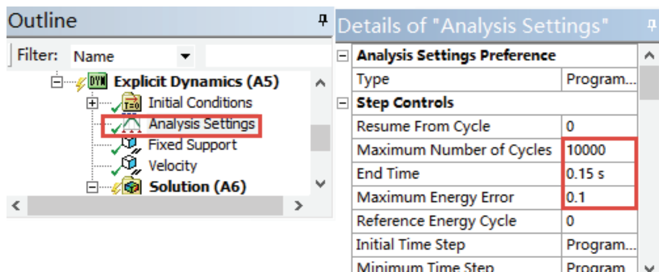


图 12-58　分析设置

Step8：在 Outlines（分析树）中的 Explicit Dynamic（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

12.3.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现图 12-59 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令和 Stress→Equivalent（von-Mises）命令，如图 12-60 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）和 Equivalent Stress（等效应力）选项。

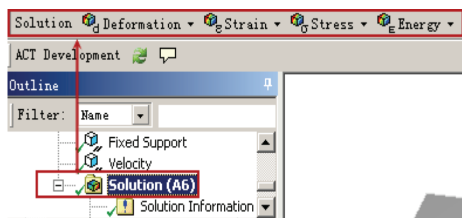


图 12-59 Solution 工具栏

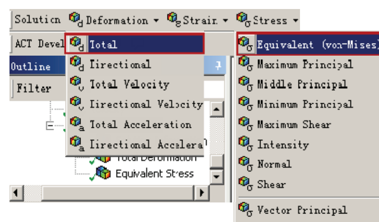


图 12-60 添加选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Equivalent All Results 命令。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）→Total Deformation（总变形），此时会出现图 12-61 所示的总变形分析云图。

Step5：等效应力云图如图 12-62 所示。

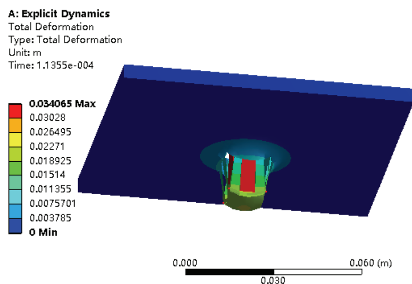


图 12-61 总变形分析云图

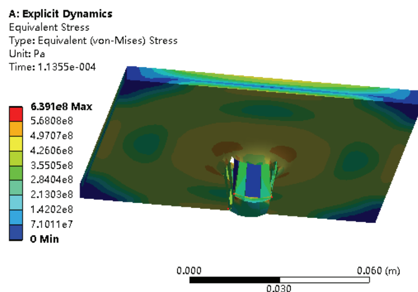


图 12-62 等效应力云图

Step6：单击图 12-63 所示的图标可以播放动画。

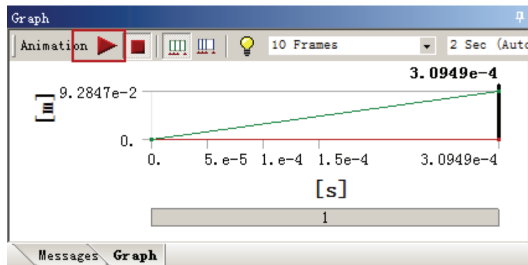


图 12-63 播放动画



Step7：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

12.3.9 启动 AUTODYN 软件

Step1：如图 12-64 所示，单击工具箱中 Component System→AUTODYN 命令，直接拖拽到项目 A 的 A5（Setup）栏中，此时在项目管理中出现项目 B。

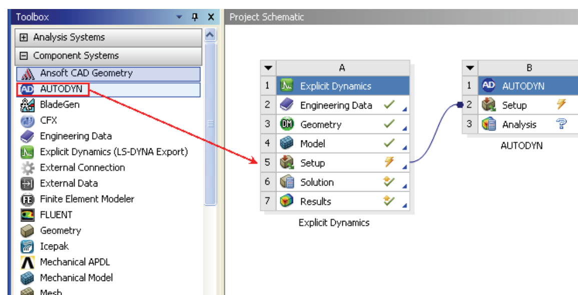


图 12-64 AUTODYN

Step2：双击项目 A 中的 A5 栏，进行计算，计算完成后如图 12-65 所示。双击项目 B 的 B2 项，即可启动 AUTODYN 软件。

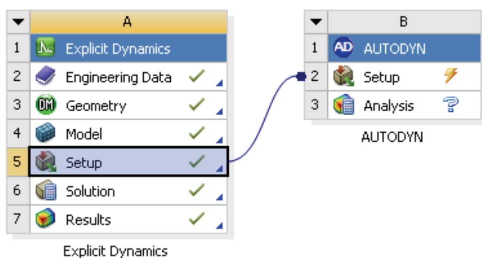


图 12-65 数据共享

Step3：如图 12-66 所示为 AUTODYN 界面，此时几何文件的所有数据均已经被读入到 AUTODYN 软件中，在软件中只需单击 ▶Run 按钮执行计算即可。

Step4：如图 12-67 所示为 AUTODYN 计算过程数据显示。

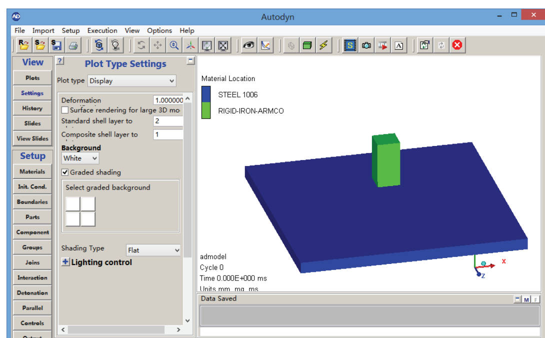


图 12-66 AUTODYN 界面

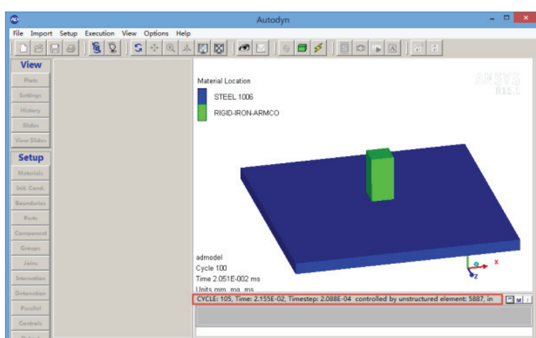


图 12-67 AUTODYN 界面计算数据显示

Step5：选择 View→Plots 命令，将显示图 12-68 所示为 AUTODYN 计算等效应力分布云图。

Step6：单击 Change variable 按钮，在弹出的图 12-69 所示的 Select Contour Variable 对话框中的 Variable 栏中选择 PRESSURE 选项，单击✓按钮。

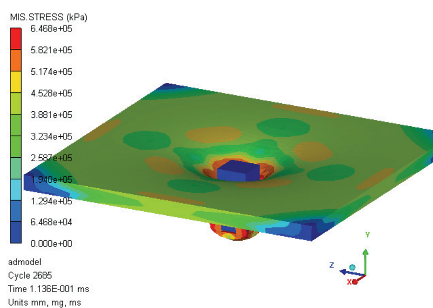


图 12-68 等效应力分布云图

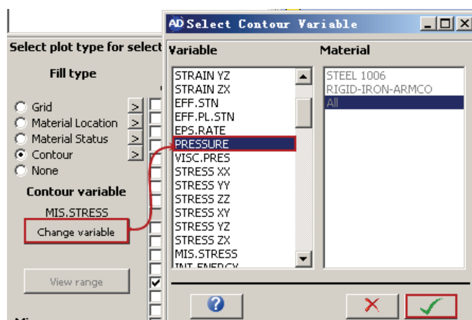


图 12-69 设置

Step7：此时出现图 12-70 所示的压力分布云图。

Step8：此时出现图 12-71 所示的位移分布云图。

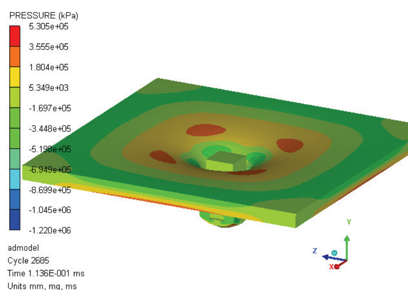


图 12-70 压力分布云图

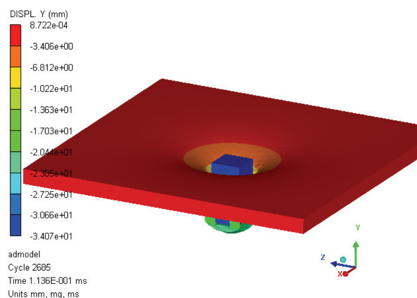
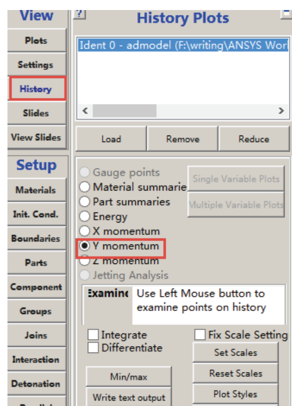


图 12-71 位移分布云图

Step9：如图 12-72 所示，依次选择 View→History→Y momentum，此时将弹出曲线图。



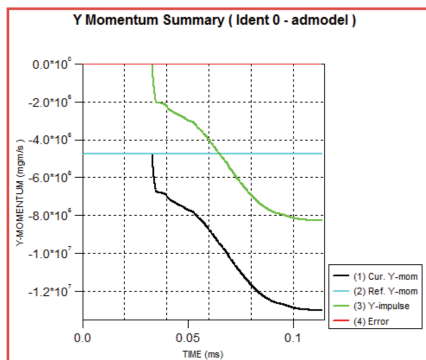


图 12-72 曲线图

Step10：关闭 Autodyn 窗口。

12.3.10 LS-DYNA 计算

Step1：如图 12-73 所示，可以添加 Explicit Dynamic（LS-DYNA Export）到项目 A 的 A4 中，此时直接双击项目 C 的 C5 即可执行相关计算处理。

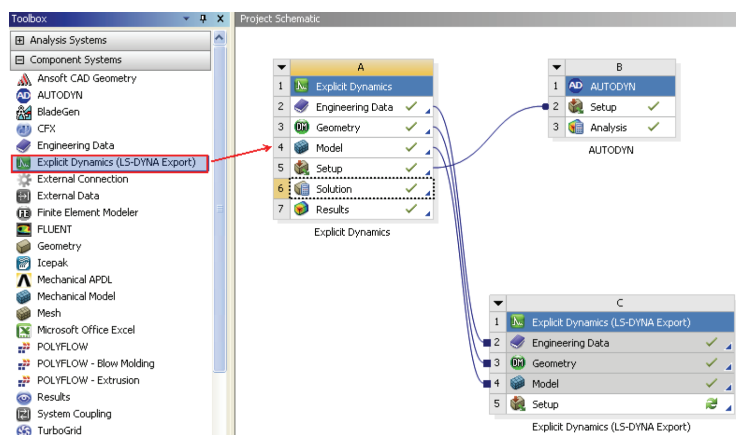


图 12-73　Explicit Dynamic（LS-DYNA Export）添加

Step2：计算完成后启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 软件，如图 12-74 所示。

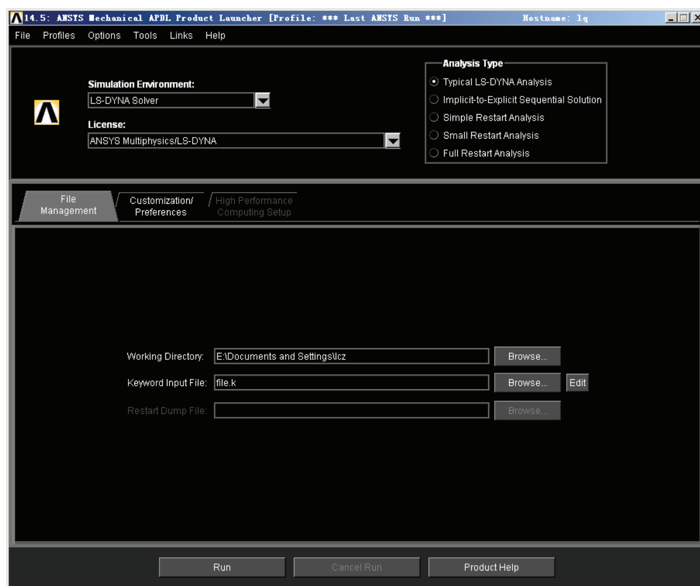


图 12-74　启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher

Step3：图 12-75 所示为 LS-DYNA 进行计算的 LOG 文件。读者感兴趣可以参考 ANSYS 经典版相关书籍，这里不详细讲解。

```
C:\Program Files\ANSYS Inc\v140\CommonFiles\TCL\bin\intel\wish.exe
system damping energy..........   0.00000E+00
sliding interface energy.......   0.00000E+00
external work..................   0.00000E+00
eroded kinetic energy..........   0.00000E+00
eroded internal energy.........   0.00000E+00
eroded hourglass energy........   0.00000E+00
total energy...................   1.00000E-20
total energy / initial energy..   1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy.   1.00000E+00
global x velocity..............   0.00000E+00
global y velocity..............   0.00000E+00
global z velocity..............   0.00000E+00
      1 t 0.0000E+00 dt 4.58E-05 flush i/o buffers           03/16/12 23:21:12

      1 t 0.0000E+00 dt 4.58E-05 write d3plot file           03/16/12 23:21:12

cpu time per zone cycle............         0 nanoseconds
average cpu time per zone cycle....      1234 nanoseconds
average clock time per zone cycle..      1446 nanoseconds

estimated total cpu time          =      2979 sec (       0 hrs 49 mins)
estimated cpu time to complete    =      2975 sec (       0 hrs 49 mins)
estimated total clock time        =      3490 sec (       0 hrs 58 mins)
estimated clock time to complete  =      3486 sec (       0 hrs 58 mins)
```

图 12-75　LOG 文件

12.3.11　保存与退出

Step1：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save （保存）按钮，在弹出来的"另存为"对话框中输入文件名为 autodyn_ex.wbpj。

Step2：单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

本章通过两个算例分别介绍了 LS-DYNA 模块与 AUTODYN 模块的计算方法，读者通过对显式动力学分析的学习，掌握其设置与求解时间步的方法。

12.4　本章小结

本章详细介绍了 ANSYS Workbench16.0 软件内置的显式动力学分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定、后处理等操作，同时还简单介绍了与 AUTODYN 和 LS—DYNA 两款软件的数据导出与两款软件的启动方法。

通过本章节的学习，读者应该对显式动力学分析的过程有详细的了解。

第 13 章　复合材料分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件复合材料分析模块 ACP 进行简单讲解，并通过一个典型案例对 ACP 模块复合材料分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
复合材料分析应用	√			
复合材料分析意义		√	√	√
ACP 软件的简介	√			
ACP 复合材料建模			√	√
ANSYS Workbench 复合材料激励			√	√
ANSYS Workbench 边界条件			√	√
ACP 复合材料后处理			√	√

13.1　复合材料概论

复合材料是指由两种或者两种以上不同性能的材料在宏观尺度上组成的多相材料。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能，它改善了组分材料的刚度、强度、热力学等性能。复合材料从应用的性质可分为功能复合材料和结构复合材料两大类。

功能复合材料主要具有特殊的功能，例如，导电复合材料，它是用聚合物与各种导电物质通过分散、层压或通过表面导电膜等方法构成的复合材料；烧灼复合材料，它由各种无机纤维增强树脂或非金属基体构成，可用于高速飞行器头部热防护；摩阻复合材料，它是用石棉等纤维和树脂制成的有较高摩擦系数的复合材料，应用于航空器、汽车等运转部件的制动。

功能复合材料由于其涉及的学科比较广泛，已不是单纯的力学问题，需要借助电磁学，化学工艺、功能学等众多学科的研究方法来研究。

结构复合材料一般由基体料和增强材料复合而成。基体材料主要是各种树脂或金属材料；增强材料一般采用各种纤维和颗粒等材料。其中增强材料在复合材料中起主要作用，用来提供刚度和强度，而基体材料用来支持和固定纤维材料，传递纤维间的载荷。

结构复合材料在工农业及人们的日常生活中得到广泛的应用，也是复合材料力学研究的主要对象，是固体力学学科中一个新的分支。在结构复合材料中按增强材料的几何形状及结构形式又可划分为以下 3 类：

1）颗粒增强复合材料：它由基体材料和悬浮在基体材料中的一种或多种金属或非金属颗粒材料组合而成。

2）纤维增强复合材料：它由纤维和基体两种组分材料组成。按照纤维的不同种类和形状又可划分定义多种复合材料。

3）复合材料层合板：它由以上两种复合材料的形式组成的单层板，以不同的方式叠合在一起形成层合板。层合板是目前复合材料实际应用的主要形式。

一般来说，强度是指材料在承载时抵抗破坏的能力。对于各向同性材料，在各个方向上强度均相等，即强度没有方向性，常用极限应力来表示材料的强度。

对于复合材料，其强度的显著特点是具有方向性。因此复合材料单层板的基本强度指标主要有沿铺层主方向（即纤维方向）的拉伸强度 X_t 和压缩强度 X_c；垂直于铺层主方向的拉伸强度 Y_t 和压缩强度 Y_c 以及平面内剪切强度 S 等 5 个强度指标。

对于复合材料层合板而言，由于它是由若干个单层板粘合在一起形成的，而单向复合材料又是正交各向异性材料，层合板的各个铺层的纤维排列方式不相同，可能导致因为受力作用所产生各铺层的变形不一致，因此，如何决定其最终强度就是一个非常复杂的问题。

复合材料层合板的强度是应用复合材料时所必须研究的关键性问题之一，如何确定其强度是进行复合材料结构设计所必须解决的一个基本问题，是安全可靠合理经济地使用复合材料的基础之一，因此对于复合材料强度的研究是复合材料领域内最早受到重视并开展研究较为广泛的一个基础性工作。但是相对于各向同性材料来说，复合材料（特别是层合板的复合材料）的强度研究要困难的多。原因在于影响其强度的因素很多，而其破坏形式又很复杂，实验数据较为分散。

根据层合板破坏的特点，目前层合板的极限强度通常按最后层破坏理论来预测，其计算步骤可以大致归纳如下：

1）通过经典层合板理论，计算得到层合板中各铺层所承担的应力和应变。

2）选用合适的破坏准则检查各铺层的强度性能，确定首先发生破坏的铺层，判断是否发生第一次降级。

3）对第一次降级的层合板重新计算刚度，并在第一次降级的相应载荷作用下，计算各铺层的应力和应变。

4）用与第 2）步相同的方法来判断是否发生新的铺层破坏的连锁反应。若有连锁反应，即出现第二次降级，在重复上述计算步骤直至无连锁反应为止；若无连锁反应，则根据新的铺层破坏条件确定第二次降级的相应载荷增量、应变增量和应力增量。

重复上述计算过程，直到层合板中全部铺层完全破坏为止，相应的载荷即为极限载荷。

13.2 层合板的失效判断准则

在实际工程应用中，往往需要提供给设计者一种准确地判定各类材料安全-破损的强度准则，并根据使用条件和其他影响因素来定出强度规范。一般地说，对于各向同性材料，在简单载荷作用下的强度规范是容易制定的。通常是根据构件的功用先确定出材料的失效标准。材料失效可以是达到屈服状态，也可以是一直到断裂；其次，根据所能够考虑到的其他影响因素以及设计的传统和经验，确定安全系数，制定出材料的允许应力。按照允许应力建立安全-破损条件，这就是所谓强度规范，使用中应该保证构件在载荷作用下的应力不大于允许应力。然而在工程应用中，材料是很少处于简单的应力状态的。即使在载荷并不复杂的

情况下，处于不同位置和不同截面上的材料也并不只是处于简单的应力状态。在复杂的应力状态下，判定材料的安全-破损极限状态，就不是仅用一个简单的比较条件所能完成的了，而复合材料强度的最显著特点也在于它的方向性。因此，在各向同性材料强度理论的基础上，国内外对于复合材料层合板强度准则的研究已经进行了相当长的时间，其间提出了不下40 种以不同数学形式表示的强度准则方程。

关于强度准则 M.J.Hinton、P.D.Soden 以及 A.S.Kaddour 发表了较为全面地预测复合材料层合板强度的论文集<<The World Wide Failure Exercise>>。多位学者在其中都提出了各自不同的关于复合材料层合板的失效准则。最近，我国学者黄争鸣，张华山等人通过一个 1991 年启动 2004 年完成的复合材料“破坏分析奥运会”评估，详细评述了纤维增强复合材料强度理论的现状及发展趋势，列出了当今世界上最具代表性的 19 种复合材料宏、细观强度理论，通过与实验比较得到 5 种精度最高的强度理论提供给工程实际参考。这 5 种被当今学术界认可的强度理论分别如下。

（1）Zinoviev 理论

该理论采用线弹性本构方程，认为铺设角随着载荷的增加而变化：

$$\left(\theta_k\right)^{(N+1)}=\left(\theta_k\right)^{(N)}+\left(d\varepsilon_{12}\right)_k^{(N+1)}, N=0,1,\mathrm{L}$$

破坏判据采用了最大应力判据，只要以下任何一个不等式成立：

$$X_t \leqslant \sigma_{11} \text{或} \sigma_{11} \leqslant -X_c$$
$$Y_t \leqslant \sigma_{22} \text{或} \sigma_{22} \leqslant -Y_c$$
$$\left|\sigma_{12}\right| \geqslant S$$

就认为单层板出现破坏。该理论能较好地预报多层板的初始破坏，对层合板最终强度的预报与实验相比在合理的范围内，因此，Zinoviev 理论是目前精度最高的理论之一。

（2）Bogetti 理论

该理论采用非线弹性三维的本构方程，只要任一单层板中的应变满足以下任何一个不等式：

$$\varepsilon_{11} \geqslant \varepsilon_{11}^t \text{或} \varepsilon_{11} \leqslant -\varepsilon^c{}_{11}$$
$$\varepsilon_{22} \geqslant \varepsilon_{22}^t \text{或} \varepsilon_{22} \leqslant -\varepsilon_{22}^c$$
$$\left|\varepsilon_{12}\right| \geqslant \varepsilon_6$$

就认为该层产生了破坏。该理论可以预报沿厚度方向所引起的层合板的初始破坏。对层合板非线性应力-应变曲线的初始部分，以及由纤维控制的最终破坏，该理论与实验数据吻合较好。

（3）Puck 理论

该理论采用了非线性本构方程，只要以下任何一个条件成立，就认为单层板出现破坏。

轴向拉伸破坏：

$$\sigma_{11} \geqslant 0$$
$$f_E=\frac{1}{\varepsilon^t{}_{11}}\left(\varepsilon_{11}+\frac{V_{12}^f}{E_{11}^f} m_\alpha \sigma_{22}\right) \geqslant 1$$

轴向压缩破坏：

$$\sigma_{11} < 0$$

$$f_E = \frac{1}{\varepsilon_{11}^c}\left|\left(\varepsilon_{11} + \frac{V_{12}^f}{E_{11}^f} m_\alpha \sigma_{22}\right)\right| \geqslant 1 - \left(10\varepsilon_{12}\right)^2$$

横向拉伸破坏：

$$\sigma_{22} \geqslant 0$$

$$f_E = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{21}}{S}\right)^2 + \left(1 - A\frac{Y_t}{S}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2} + A\frac{\sigma_{22}}{S} \geqslant 1 - \left|\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{1D}}\right|$$

横向受压剪切破坏：

$$\sigma_{22} < 0$$

$$f_E = \frac{1}{S}\sqrt{\left(\sigma_{21}\right)^2 + \left(B\sigma_{22}\right)^2} + B\sigma_{22} \geqslant 1 - \left|\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{1D}}\right|$$

斜面剪切破坏：

$$\sigma_{22} < 0 \text{且} \left|\frac{\sigma_{21}}{\sigma_{22}}\right| \leqslant \frac{c}{\tau_{21C}}$$

$$f_E = \left[\left(\frac{\sigma_{21}}{2(1+\mathrm{D})\mathrm{S}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2\right]\frac{Y}{(-\sigma_{22})} \geqslant 1 - \left|\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{1D}}\right|$$

以上各系数的确定较为复杂，有些依赖于经验值。该理论对单向复合材料的预报与实验吻合较好，对层合板最终强度预报大体上与实验相符，与实验的主要差别来自于在有较大非线性变形的情况下，预报的最大应变远小于实测值，预报的最终强度与实验值也有较大差别。

（4）Cuntze 理论

该理论采用了线性本构方程，只要满足下列任何一个条件，就认为单层板出现破坏。

轴向拉伸破坏：

$$k_1 = \varepsilon_{11}E_{11}/X_t \geqslant 1$$

轴向压缩破坏：

$$k_2 = \sigma_{11}/X_c \leqslant -1$$

横向拉伸：

$$k_3 = \sigma_{22}/Y_c \geqslant 1$$

横向剪切破坏：

$$k_4 = \frac{\sqrt[3]{\sigma_{21}^3 + 2 \cdot b_1 \cdot \sigma_{22} \cdot \sigma_{21}^2}}{S} \geqslant 1$$

斜面剪切破坏：

$$k_5 \geqslant 1$$

其中，K_5是以下二次方程的正根：

$$\frac{(b_2-1)\cdot(\sigma_{22}+\sigma_{33})}{k_5\cdot Y_c}+\frac{b_2\cdot(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2+b_3\cdot\sigma_{21}}{(k_5\cdot Y_c)^2}=1$$

该理论在 Puck 理论的基础上，综合考虑了多重非线性因素，但对大变形或耦合非线性的情况存在不收敛的现象。

（5）Tsai 理论

采用线弹性本构方程，只要满足下列条件，就认为单层板出现破坏：

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_tX_c}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_tY_c}\right)^2+\left(\frac{1}{X_t}-\frac{1}{X_c}\right)\sigma_{11}+\left(\frac{1}{Y_t}-\frac{1}{Y_c}\right)\sigma_{22}+\left(\frac{4F_1\sigma_{11}\sigma_{22}}{\sqrt{X_tX_cY_tY}}\right)+\left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2\geqslant 1$$

在复合材料力学界最为有名的强度理论之一就是 Tsai-Wu 理论，考虑了应力之间的相互影响，对单向复合材料，Tsai 理论的精确度最高，然而对于层合板，Tsai 理论表现不是很理想，对初始破坏强度预报比较差，最终破坏强度与其他几个理论相比存在欠缺。

由于 Tsai 理论使用了线弹性本构关系，对于层合板的非线性应变的预测与实验结果相差较远。

另外，我国学者黄争鸣基于细观力学理论建立了一种改进的最大正应力判据检测基体或纤维的拉伸破坏，该理论是唯一可以计算纤维和基体中热应力的理论，但是在计算中该理论对其他单层板的 5 个力学参数预报的精确度较差，因此其应用范围较狭窄。

李华详、刘应华等人通过细观力学的方法，结合宏细观尺度的对应关系得到复合材料的宏观屈服准则，该理论对含周期性微结构复合材料的具有一定的适用性。

总之，失效判据是个极其复杂的问题，尽管以上一些强度理论在当前得到一定范围的应用，但精度最高的也只有 67.5%，因此需要不断地总结、发现，渐渐用数学物理方程来揭示复合材料真实的性质，建立更符合客观实际的失效准则。

13.3 复合材料层合板强度的有限单元法

复合材料的就位特性、各向异性和层状性所产生的各种复杂的力学现象，使得有限元计算技术对于求解复合材料及其结构的力学问题得到了相当广泛的应用。在这一领域可分为两个分支：一是有限元法应用于复合材料结构（如板、壳等）力学问题；二是有限元技术应用于复合材料细观力学行为的模拟分析。前者追求真实工程环境下的工程结构问题的解决，后者侧重于材料细观结构与力学性能的关系分析。

在当前理论研究不完善的条件下，数值计算已经成为指导工程实践的最有效的工具。有限单元法的引入大大缩短了理论与实际的距离，复合材料各种力学性能参数可以借助有限元软件很方便得到。

过去，对于如何知道一个实际的复合材料结构在复杂外载荷条件下的破坏模式及破坏强度，一直是人们十分关心的问题，在数值计算没有广泛应用之前人们只能采用结构整机试验，这种方法一般来说既费时又费钱。

随着有限元及计算机软硬件的不断发展，用软件来预测和模拟计算复合材料结构的力学性能参数、破坏强度以及破坏过程越来越受到研究人员的重视。因此，许多著名的有限元软件实现了复合材料层合板的应力和应变的计算，有些软件层合板的强度计算功能也非常强大，例如，ANSYS、ESDU、PATRAN、DYNA3D PAMCRASH、PAMSISS、NASTRAN、ABAQUS 等，都实现了复合材料层合板强度的计算，但是计算结果的准确性及合理性需要通过实践来检验。

除了结果的准确性和合理性外，各种有限元软件的计算的理论基础也需要参考最新的理论成果加以不断的修改和完善，比如在 ANSYS 中，仅仅定义了经典强度理论中的 3 种复合材料的破坏准则：最大应变失效准则、最大应力失效准则、Tasi-Wu 失效准则。

13.4 ANSYS ACP 模块功能概述

ANSYS Composite PrepPost（ACP）是集成于 ANSYS Workbench 平台的全新的复合材料前/后处理模块，可以与 ANSYS 其他模块实现数据的无缝连接。该模块在处理层压复合材料结构方面具有强大的功能。

注：ACP 模块需要单独授权安装。

1）ACP 与 ANSYS 其他模块实现了数据无缝传递，如图 13-1 所示。

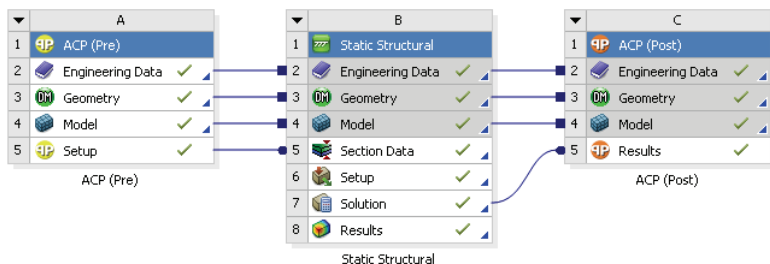


图 13-1 ACP 与 ANSYS 其他模块数据传递

2）ACP 集成于 Workbench 平台，人性化的操作界面，有利于分析人员进行高效率地复合材料建模，如图 13-2 所示。

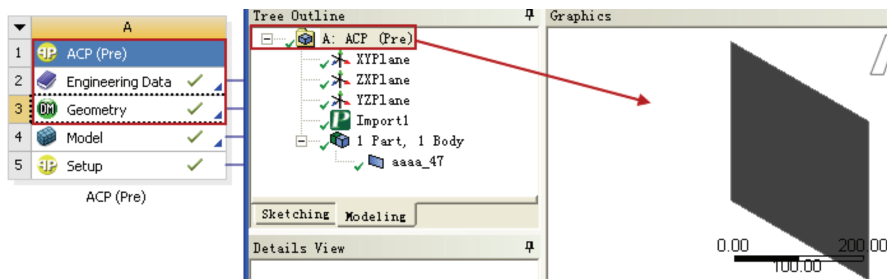


图 13-2 ACP 集成于 ANSYS Workbench 平台

3）ACP 提供了详细的复合材料的材料属性定义方式，如图 13-3 所示。

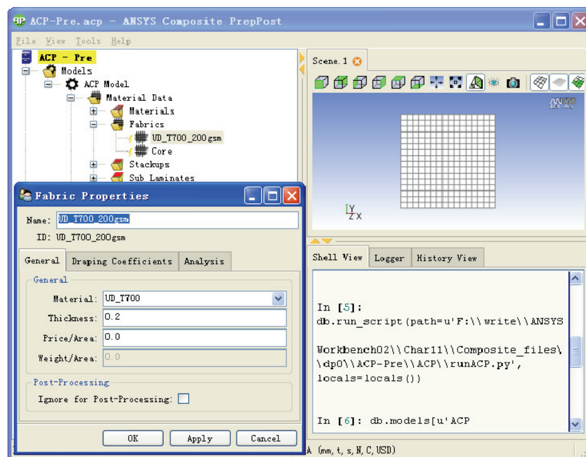


图 13-3　ACP 复合材料定义方式

4）在 ACP 模块中，可以直观地定义复合材料铺层信息，如铺层顺序、铺层材料属性、铺层厚度以及铺层方向角等，同时提供了铺层截面信息的检查和校对功能，如图 13-4 所示。

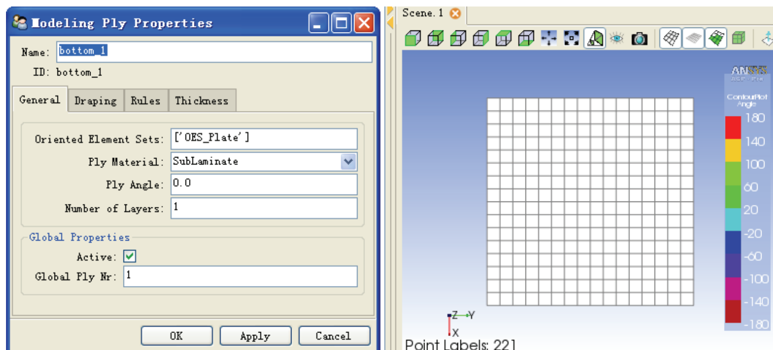


图 13-4　ACP 铺层信息的检查和校对

5）针对复杂的、形状多变的结构，ACP 还提供了 OES（Oriented Element Set）功能，可以精确方便地解决复合材料铺层方向角的问题，如图 13-5 所示。

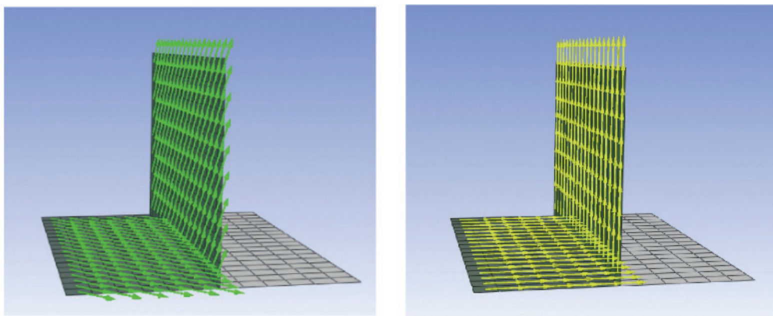


图 13-5　ACP 铺层方向角

在处理复合材料失效问题上，ACP 模块中提供了以下 3 种失效准则。

（1）失效模式无关的失效准则

最大应力准则：单向复合材料最大应力准则认为，当材料在复杂应力状态下由线弹性状态进入破坏，是由于其中某个应力分量达到了材料相应的基本强度值。

最大应变准则：复合材料在复杂应力状态下进入破坏状态的主要原因是材料各正轴方向的应变值达到了材料各基本强度所对应的应变值。

（2）多项式失效模式准则

Tsai-Hill（蔡-希尔）准则：对于材料主轴方向拉压强度相等的正交异性材料而言，满足以下公式。

$$F(\sigma_x-\sigma_y)^2+G(\sigma_y-\sigma_z)^2+H(\sigma_z-\sigma_x)^2+2L\tau_{yz}^2+2M\tau_{zx}^2+2N\tau_{xy}^2=1$$

$$(F+H)\sigma_x^2+(F+G)\sigma_y^2(H+G)\sigma_z^2-2H\sigma_x\sigma_z-2G\sigma_y\sigma_z-2F\sigma_x\sigma_y+2L\tau_{yz}^2+2M\tau_{zx}^2+2N\tau_{xy}^2=1$$

式中，F、G、H、L、M、N称为各向异性系数。

Tsai-Wu（蔡-吴）准则：蔡-吴准则的一般形式为：

$$f(\sigma)=F_i\sigma_i+F_{ij}\sigma_{ij}(i,j=1,2,6)$$

式中，F_i和F_{ij}是表征材料强度性能的参数，为对称张量。

（3）失效模式相关的失效准则

Hashin 准则：基于材料的参数退化准则，并考虑单层板的累计损伤。

Puck 准则：Puck 准则认为只要以下五个破坏形式中的任何一个条件成立，就认为单层板出现破坏，它们是轴向拉伸破坏、轴向压缩破坏、横向拉伸破坏、横向受压剪切破坏及斜面剪切破坏。

LaRC 准则：用于判定基体开裂和纤维断裂两种失效形式的准则。LaRC 失效准则是直接与失效机理相关的，并与失效包络有很好的吻合，该准则考虑到拉伸和压缩两种载荷，分别对基体开裂和纤维断裂两种形式进行分析。

ACP 模块还具有强大的结果后处理功能，可获得各种分析结果，如层间应力、应力、应变、最危险的是小区域等；分析结果既可以整体查看，也可以针对每一层进行查看。同时，分析人员也可以很方便地实现多方案分析，如改变材料属性/几何尺寸等，分别如图 13-6 和图 13-7 所示。

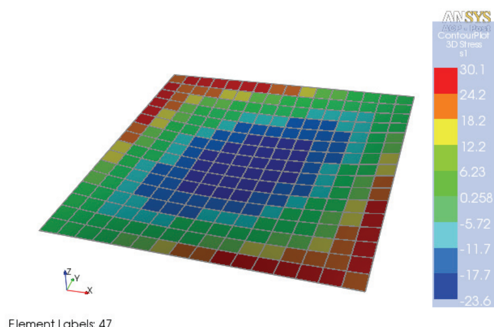


图 13-6　ACP 模型整体结果

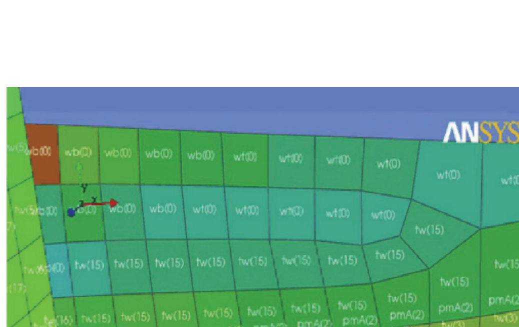


图 13-7　ACP 失效准则结果显示

ACP 模块还提供了 Draping and flat-wrap 功能，针对分析结果可以对复合材料进行“覆盖-展开”操作，这将非常有利于复合材料的加工制造，如图 13-8 所示。

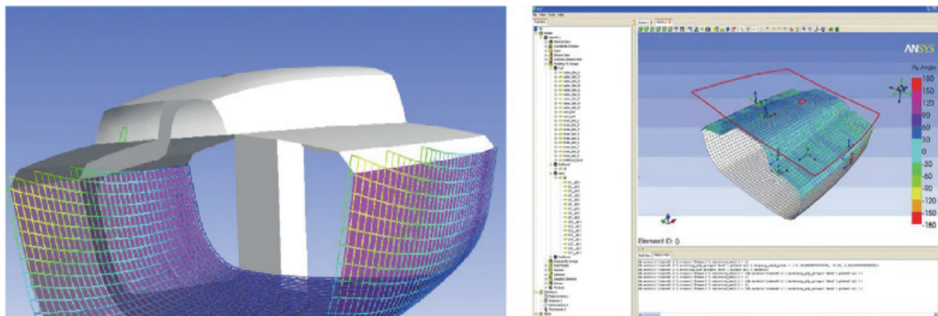


图 13-8　ACP 复合材料的“覆盖-展开”

13.5　复合材料静力学分析实例——复合板受力分析

本节通过一个简单的案例介绍 ANSYS Workbench 16.0 平台的 ACP 复合材料分析模块对复合板进行应力及失效准则的计算，计算复合板在静拉力作用下各层的失效情况。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 平台的 ACP 模块的操作方法及求解过程

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter13\char13-1\Composite.wbpj

13.5.1 问题描述

如图 13-9 所示的复合板模型，请用 ANSYS Workbench 分析复合板在拉力 F=5000N 作用下，另外一个边固定时的变形情况，同时计算应力分布及各层的失效云图。

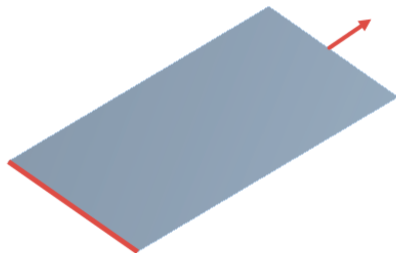


图 13-9　复合板模型

13.5.2 启动 Workbench 软件

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：单击 File 菜单中的 Restore Archive 命令，读取已备份的工程文件，在弹出的图 13-10 所示的 Select Archive to Restore 对话框中选择工程文件名为 Composite.wbpz 的文件，并单击“打开”按钮。

Step3：在弹出的“另存为”对话框中输入文件名为 Composite，并单击“保存”按钮，完成工程的保存。

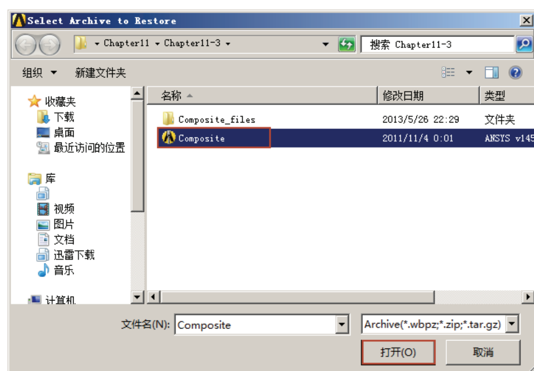


图 13-10　导入工程文件

13.5.3 静力分析项目

Step1：双击项目 A 中的 A7（Results）命令，此时将加载图 13-11 所示静力分析界面显示的两个云图。

注：在静力分析界面中，读者可以查看边界条件、网格尺寸及后处理等各种操作，这里不再赘述，请读者自己完成。

Step2：关闭静力分析平台，回到 Workbench 平台。

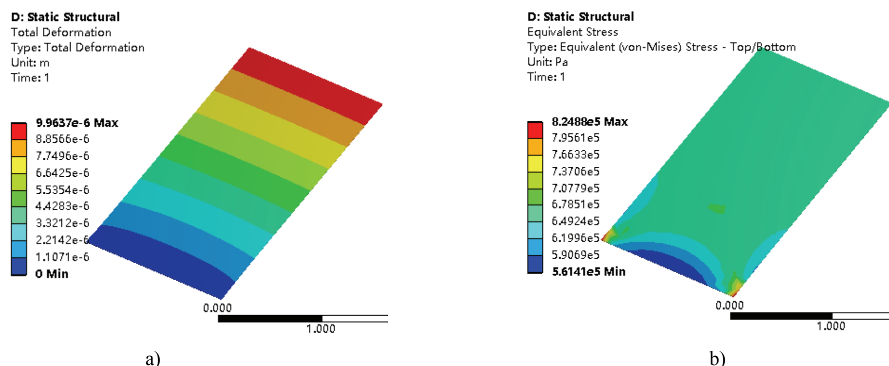


图 13-11　静力分析界面

a) 位移云图　b) 应力云图

Step3：右键单击 A5（Setup）命令，在弹出的图 13-12 所示的快捷菜单中依次选择 Transfer Data From New→ACP（Pre）命令，此时工程变成图 13-13 所示的样式。

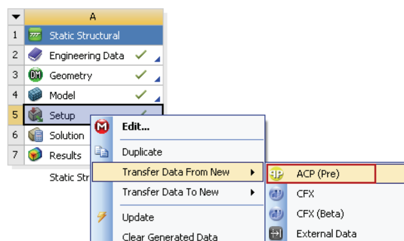


图 13-12　快捷菜单

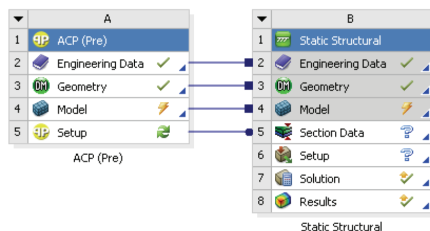


图 13-13　插入 ACP



13.5.4 定义复合材料数据

Step1：双击 A2（Engineering Data），在弹出的图 13-14 所示对话框中进行材料数据定义，具体定义如下。

在 Outline of SchematicA2，B2：Engineering Data 栏中输入材料名称为 UD_T700。

将 Toolbox 中的 Linear Elastic→Orthotropic 命令拖拽到 Properties of Outline Row4：UD_T700 栏的 A1（Property）中。

在 Young’s Modules X direction 栏中输入 1.15E+05。

在 Young’s Modules Y direction 栏中输入 6430。

在 Young’s Modules Z direction 栏中输入 6430。

在 Poission’s Ratio XY 栏中输入 0.28。

在 Poission’s Ratio YZ 栏中输入 0.34。

在 Poission’s Ratio XZ 栏中输入 0.28。

在 Shear Modules XY 栏中输入 6000。

在 Shear Modules YZ 栏中输入 6000。

在 Shear Modules XZ 栏中输入 6000。

将 Toolbox 中的 Strength→Orthotropic Stress Limits 命令拖拽到 Properties of Outline Row4：UD_T700 栏的 A1（Property）中。

在 Tensile X direction 栏中输入 1500。

在 Tensile Y direction 栏中输入 30。

在 Tensile Z direction 栏中输入 30。

在 Compressive X direction 栏中输入-700。

在 Compressive Y direction 栏中输入-100。

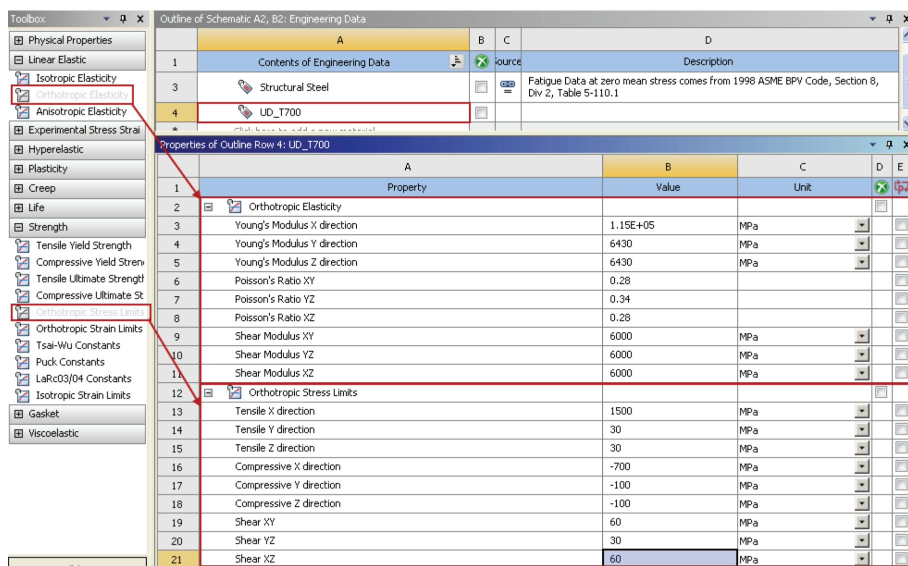


图 13-14　自定义材料

在 Compressive Z direction 栏中输入-100。

在 Shear XY 栏中输入 60。

在 Shear YZ 栏中输入 30。

在 Shear XZ 栏中输入 60。

注：输入数值前，应先将表 C 中的所有单位均改成 MPa（如果单位不是 MPa）;

Step2： 同样操作定义材料名称为 Corecell_A550，在弹出的图 13-15 所示对话框中进行材料数据定义，具体定义如下。

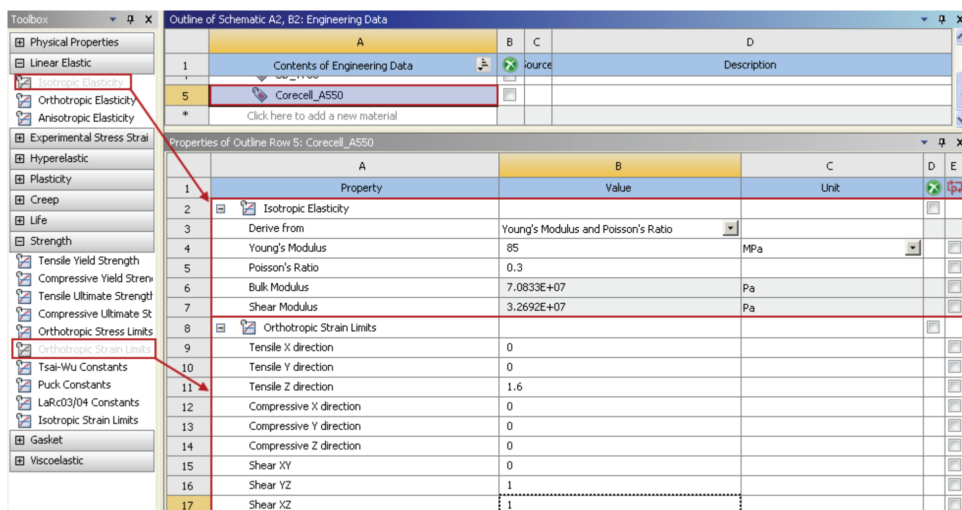


图 13-15　自定义材料

在 Outline of SchematicA2，B2：Engineering Data 栏中输入材料名称为 Corecell_A550。

将 Toolbox 中的 Linear Elastic→Isotropic 命令拖拽到 Properties of Outline Row5：Corecell_A550 栏的 A1（Property）中。

在 Derive from 栏中选择 Young's Modules and Poission's Ratio 选项。

在 Young's Modules 栏中输入 85。

在 Poission's Ratio 栏中输入 0.3。

将 Toolbox 中的 Strength→Orthotropic Strain Limits 命令拖拽到 Properties of Outline Row5：Corecell_A550 栏的 A1（Property）中。

在 Tensile X direction 栏中输入 0。

在 Tensile Y direction 栏中输入 0。

在 Tensile Z direction 栏中输入 1.6。

在 Compressive X direction 栏中输入 0。

在 Compressive Y direction 栏中输入 0。

在 Compressive Z direction 栏中输入 0。

在 Shear XY 栏中输入 0。

在 Shear YZ 栏中输入 1。

在 Shear XZ 栏中输入 1。

注：输入数值前，应先将表 C 中的所有单位均改成 MPa（如果单位不是 MPa）;



Step3：返回到 Workbench 平台工程界面。

13.5.5 数据更新

Step1：如图 13-16 所示，右键单击项目 A 中的 A4（Model）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Update 命令更新数据。

Step2：如图 13-17 所示，右键单击项目 A 中的 A5（Setup）命令，在弹出的快捷菜单中选择 Refresh 命令刷新输入数据。

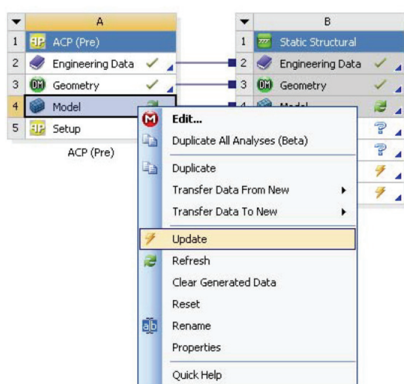


图 13-16　更新数据

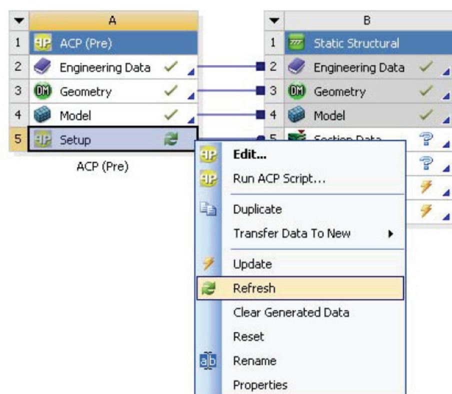


图 13-17　刷新数据

Step3：双击项目 A 中的 A5（Setup）命令，启动图 13-18 所示 ACP（Pre）平台界面，在 ACP 平台中能完成复合材料的定义工作。

注：由于篇幅限制，本实例不对 ACP（Pre）平台界面进行详细介绍，ACP 模块详细介绍将在后续的书籍中进行详细讲解。

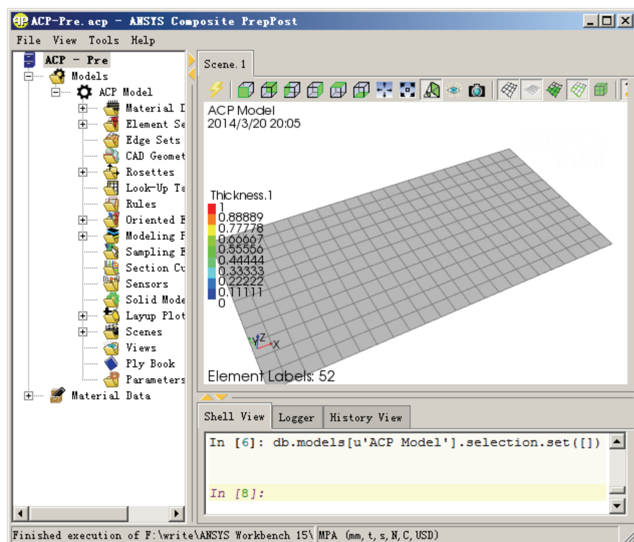


图 13-18　ACP（Pre）平台界面

13.5.6 ACP 复合材料定义

Step1： 依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Fabrics 命令，如图 13-19 所示，并在 Fabrics 命令上单击鼠标右键在弹出的快捷菜单中选择 Create Fabric…命令。

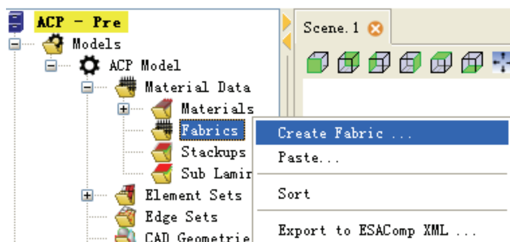


图 13-19 创建复合材料

Step2： 在弹出的图 13-20 所示的 Fabric Properties 对话框进行复合材料设置。

在 Name 栏中输入材料名称为 UD_T700_200gsm。

在 General→Material 栏中选择 UD_T700 选项。

在 General→Thickness 栏中输入厚度为 0.2，其余默认并单击 OK 按钮。

Step3： 同样操作定义图 13-21 所示的 Core 材料。

在 Name 栏中输入材料名称为 Core。

在 General→Material 栏中选择 Corecell_A550 选项。

在 General→Thickness 栏中输入厚度为 15，其余默认并单击 OK 按钮。

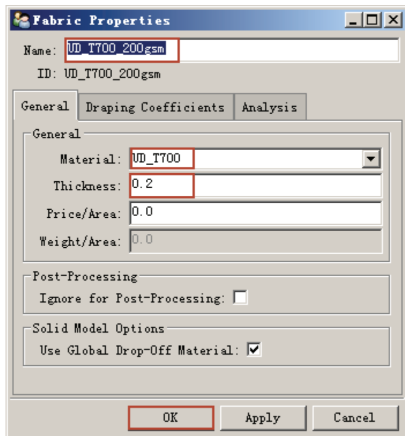


图 13-20 材料参数定义

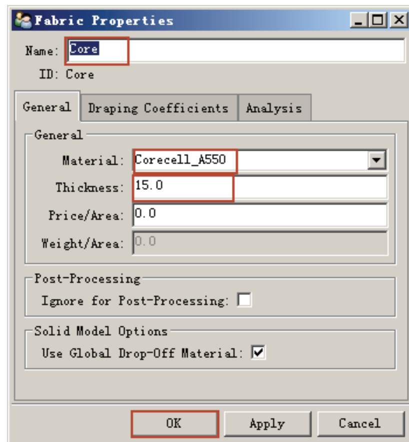


图 13-21 材料参数定义

Step4： 依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Stackups 命令，如图 13-22 所示，并在 Stackups 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Stackups…命令。

Step5： 在弹出的图 13-23 所示的 Stackup Properties 对话框中进行如下设置。

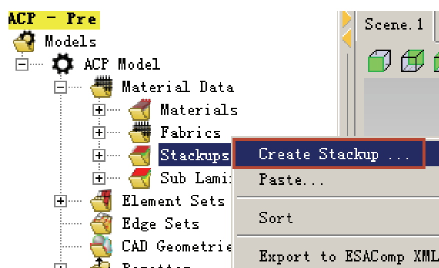


图 13-22　快捷菜单

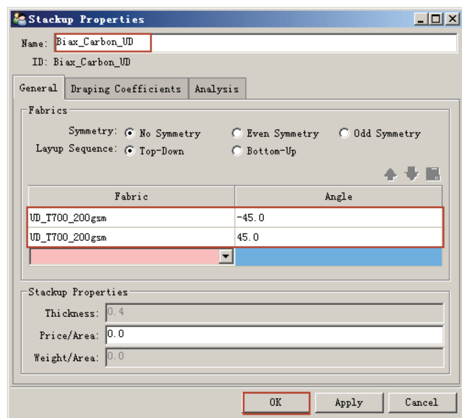


图 13-23　材料参数定义

在 Name 栏中输入名字为 Biax_Carbon_UD。

在 Fabric→Fabric 栏中选择 UD_T700_200gsm 选项，在 Angle 栏中输入 45°。

在下一个 Fabric 栏中选择 UD_T700_200gsm 选项，在 Angle 栏中输入-45°，其余默认并单击 OK 按钮，完成输入。

单击 Analysis 选项卡，勾选 Layup→Analysis Plies（AP）选项。

勾选 Text→Angle 选项。

勾选 Polar→E1、E2、G12 3 个选项，并单击 Apply 按钮，此时出现图 13-24 所示的极坐标属性。

Step6： 依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→SubLaminate 命令，如图 13-25 所示，并在 Stackups 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create SubLaminate...命令。

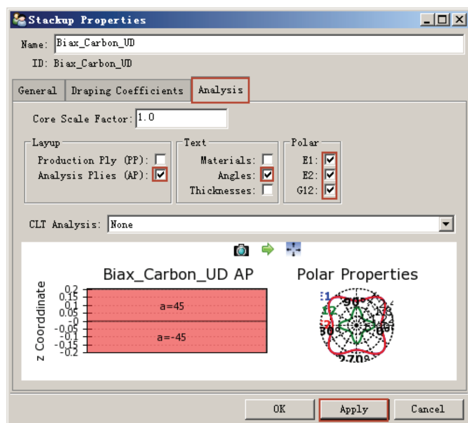


图 13-24　材料分析定义

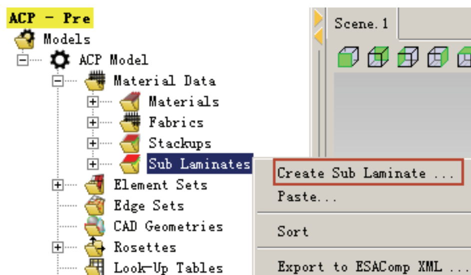


图 13-25　快捷菜单

Step7： 在弹出的图 13-26 所示的 SubLaminate Properties 对话框中进行如下设置。

在 Name 栏中输入名字为 SubLaminate。

在 Fabric→Fabric 栏中选择 Biax_Carbon_UD 选项，在 Angle 栏中输入 0。

在下一个 Fabric 栏中选择 UD_T700_200gsm 选项，在 Angle 栏中输入 90。

在第三个 Fabric 栏中选择 Biax_Carbon_UD 选项，在 Angle 栏中输入 0。

其余默认并单击 Apply 按钮，完成输入。

单击 Analysis 选项卡，勾选 Layup→Analysis Plies（AP）选项。

勾选 Text→Angle 选项。

勾选 Polar→E1、E2、G12 3 个选项，并单击 Apply 按钮，此时出现图 13-27 所示的极坐标属性。

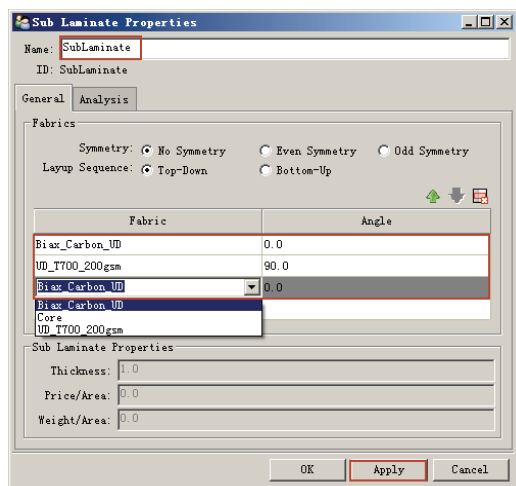


图 13-26　材料参数定义

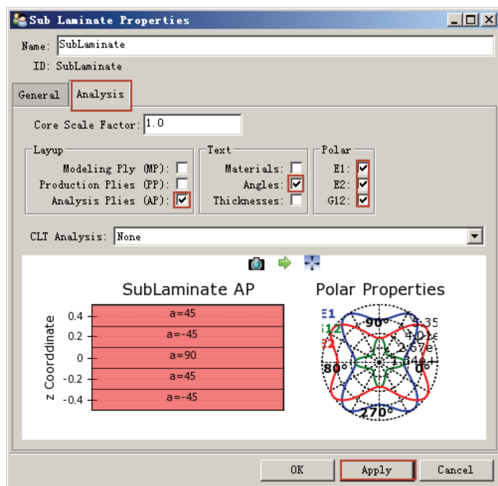


图 13-27　材料分析定义

Step8： 依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→OrientedElementSet 命令，如图 13-28 所示，并在 OrientedElementSet 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create OrientedElementSet…命令。

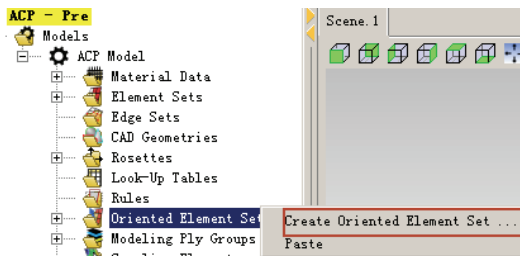


图 13-28　快捷菜单

Step9： 在弹出的图 13-29 所示的 Oriented Element Set Properties 对话框中进行如下设置。

在 Name 栏中输入名字为 OES_Plate。

在 General 选项卡中进行如下设置。

选中 Orientation→Element Sets 栏中[]，然后选择 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→ElementSets 命令，此时[]将变成[‘All_Elements’]。



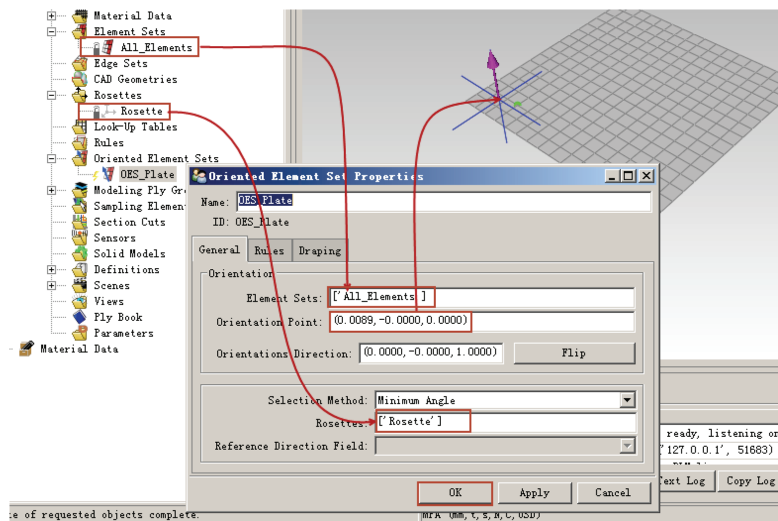


图 13-29　单元方向属性

在 Orientatioin Point 栏中选中内容，然后单击几何图形的任意一点，此时将输入坐标点。

在 Rosettes 栏中选择 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Rosettes 命令，此时[]将变成['Rosettes']。

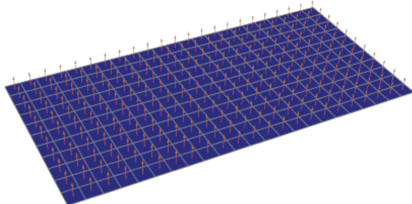
单击 Apply 按钮确定输入。

Step10：在 Rosettes 栏中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Update 命令。

Step11：在工具栏中单击图标，几何将显示材料方向如图 13-30 所示。

Step12：在工具栏中单击图标，几何将显示材料方向如图 13-31 所示。

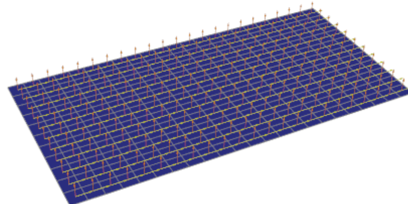
ACP Model
2014/3/20 20:09
Selection:
OES - OES_Plate
Thickness.1
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2



Element Labels: 191
thickness: 17.2

图 13-30　单元方向属性 1

ACP Model
2014/3/20 20:10
Selection:
OES - OES_Plate
Thickness.1
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2
17.2



Element Labels: 16
thickness: 17.2

图 13-31　单元方向属性 2

Step13：依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Modeling Ply Group 命令，如图 13-32 所示，并在 Modeling Ply Group 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Ply Group…命令。

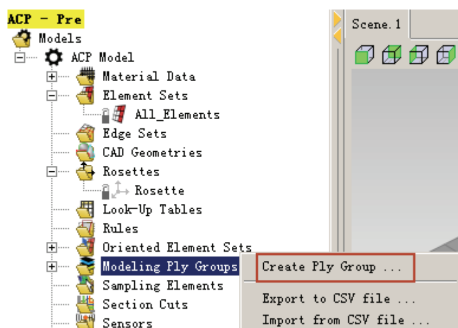


图 13-32　快捷菜单 1

Step14：在弹出的图 13-33 所示的 Ply Group Properties 对话框中进行如下设置。



图 13-33　对话框

在 Name 栏中输入名字为 sandwich_bottom。

单击 OK 按钮确定输入。

Step15：同样操作添加其他两项名字分别为 sandwich_core 及 sandwich_top，如图 13-34 和图 13-35 所示。

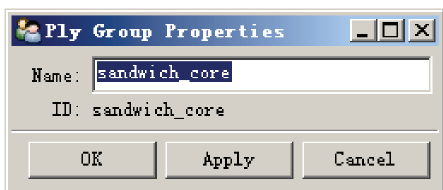


图 13-34　对话框



图 13-35　对话框

Step16：依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Modeling Ply Groups→sandwich_bottom 命令，如图 13-36 所示，并在 sandwich_bottom 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Ply…命令。

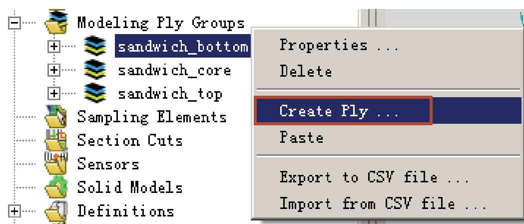


图 13-36　快捷菜单 2

Step17：在弹出的图 13-37 所示的 Modeling Ply Properties 对话框中进行如下设置。

在 Name 栏中输入名字为 bottom_1。

在 General 选项卡中进行如下设置。

选中 Orientation→Element Sets 栏中[]，然后选择 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Oriented ElementSets 命令，此时[]将变成[‘OES_plate’]。

在 Ply Material 栏中选 SubLaminate 选项。

其余选项默认即可单击 OK 按钮确定输入。

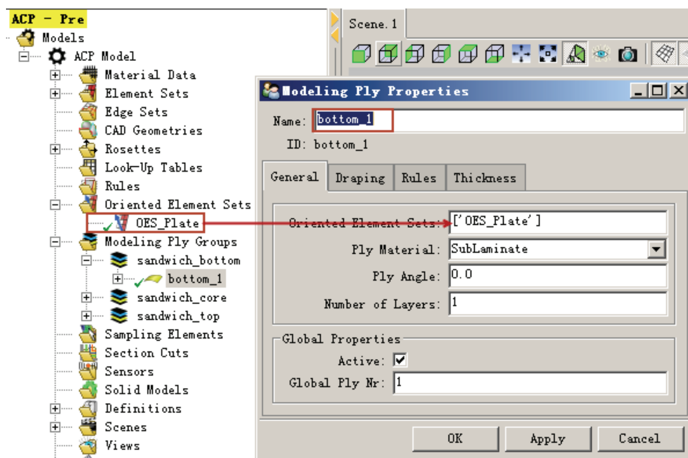


图 13-37　单元属性

Step18：依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Modeling Ply Groups→sandwich_core 命令，如图 13-38 所示，并在 sandwich_core 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Ply…命令。

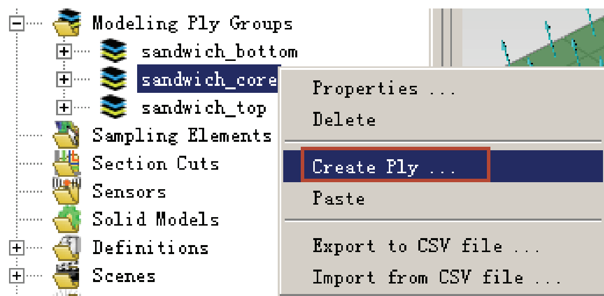


图 13-38　快捷菜单

Step19：在弹出的图 13-39 所示的 Modeling Ply Properties 对话框中进行如下设置。

在 Name 栏中输入名字为 bottom_2。

在 General 选项卡中进行如下设置。

选中 Orientation→Element Sets 栏中[]，然后选择 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Oriented ElementSets 命令，此时[]将变成[‘OES_plate’]。

在 Ply Material 栏中选 Core 选项。

其余选项默认即可单击 OK 按钮确定输入。

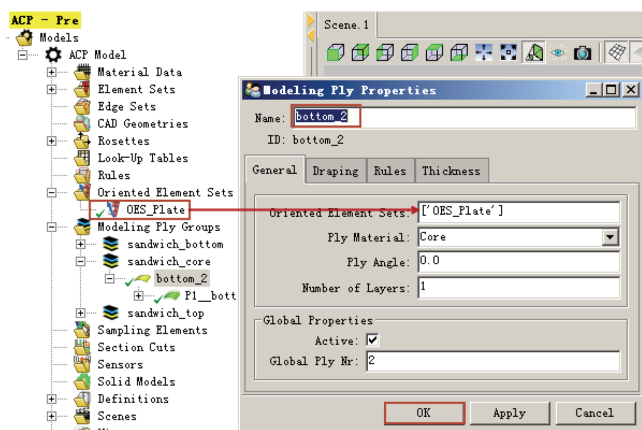


图 13-39 设置单元属性 1

Step20：依次单击 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Modeling Ply Groups→sandwich_top 命令，如图 13-40 所示，并在 sandwich_top 命令上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Create Ply…命令。

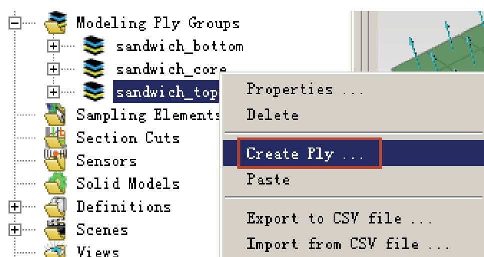


图 13-40 快捷菜单

Step21：在弹出的图 13-41 所示的 Modeling Ply Properties 对话框中进行如下设置。

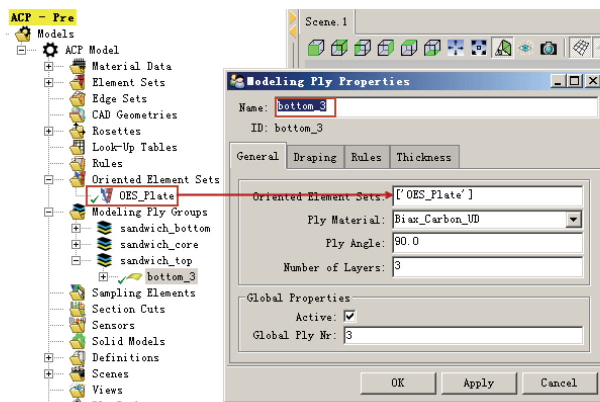


图 13-41 设置单元属性 2

在 Name 栏中输入名字为 bottom_3。

在 General 选项卡中进行如下设置。

选中 Orientation→Element Sets 栏中[]，然后选择 ACP-Pre→Models→ACP Model→Material Data→Oriented ElementSets 命令，此时[]将变成['OES_plate']。

在 Ply Material 栏中选 Biax_Carbon_UD 选项。

在 Ply Angle 栏中输入 90。

在 Number of Layers 栏中输入 3。

其余选项默认即可单击 OK 按钮确定输入。

Step22：右键单击 sandwich_bottom 命令，并选择 Update 选项刷新数据后，Modeling Ply Groups 选项变成图 13-42 所示之内容。

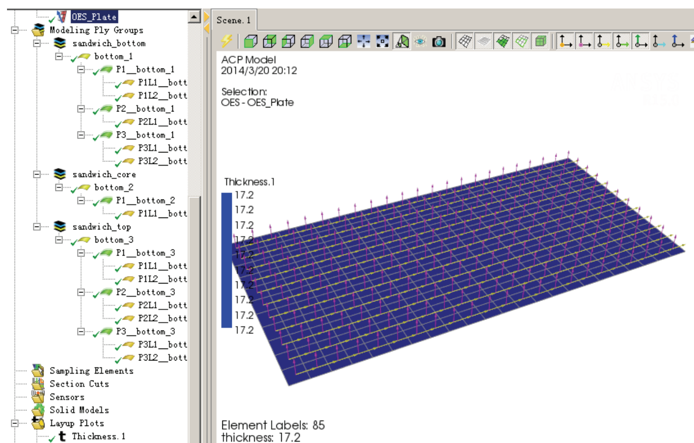


图 13-42 复合材料层数据

Step23：单击 File 菜单中的 Save Project 命令，关闭 ACP（Pre）平台，返回到 Workbench 主界面。

13.5.7 有限元计算

Step1：右键单击项目 A 中的 A5（Setup）命令，在图 13-43 所示的快捷菜单中选择 Update 命令更新数据。

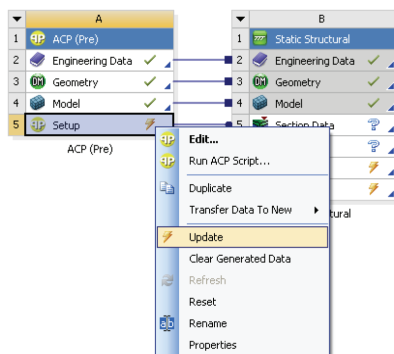


图 13-43 更新数据

Step2： 右键单击项目 B 中的 B5（Section Data）命令，在图 13-44 所示的快捷菜单中选择 Refresh 命令更新输入数据。

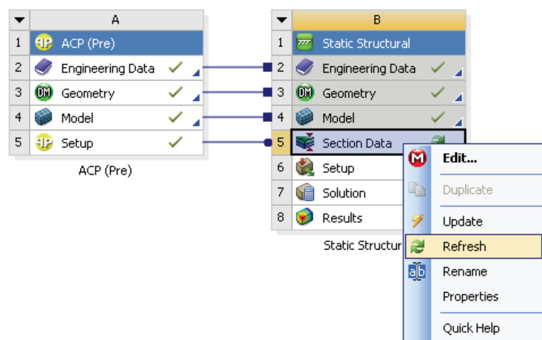


图 13-44 更新输入数据

Step3： 单击 Workbench 工具栏中的 Update Project 命令计算其他数据。

13.5.8 后处理

Step1： 双击项目 B 中的 B8（Result）命令进入后处理界面，如图 13-45 所示为复合材料变形云图。

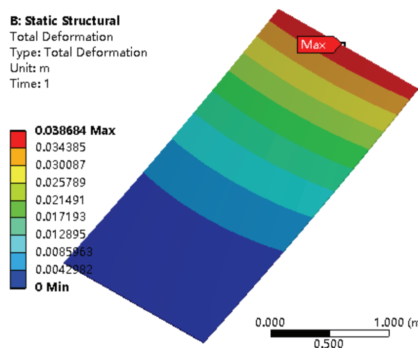


图 13-45 变形云图

Step2： 图 13-46 所示应力分布云图。

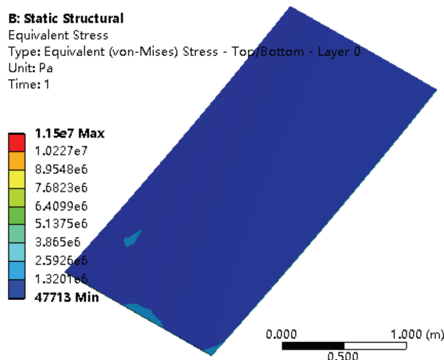


图 13-46 应力分布云图

13.5.9 ACP 专业后处理工具

Step1：如图 13-47 所示，在 Toolbox→Component System 中单击 ACP（Post）直接拖拽到 B4（Model）栏中。

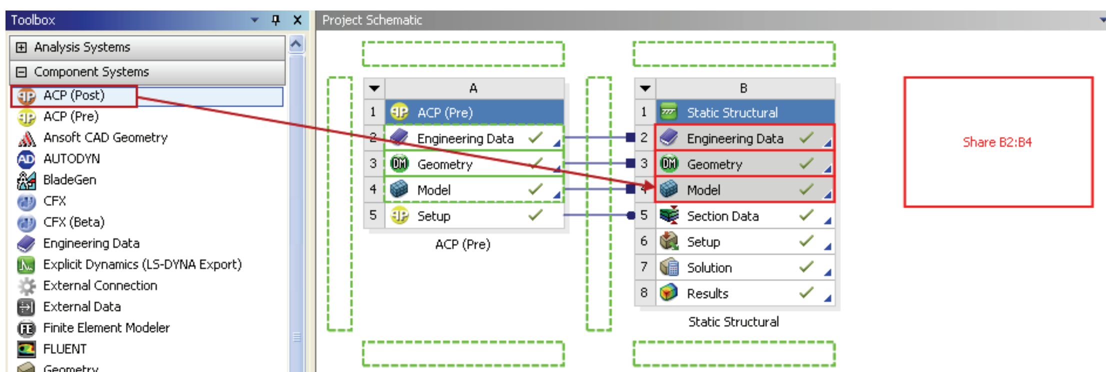


图 13-47　ACP 后处理工具

Step2：将 B7 直接拖拽到 C5 中，如图 13-48 所示。

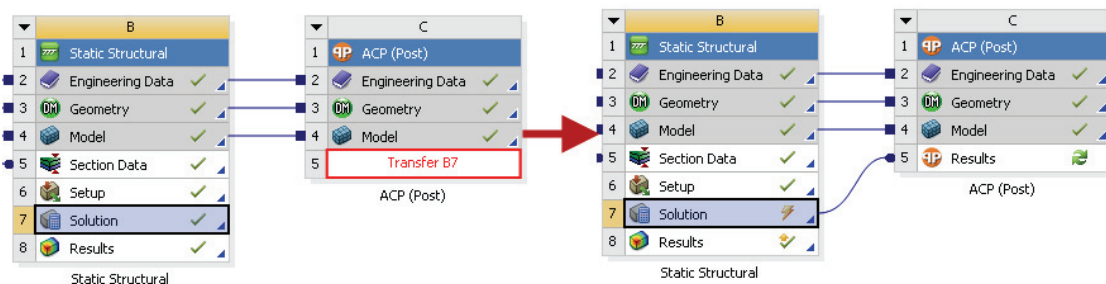


图 13-48　传递载荷

Step3：单击 Workbench 工具栏中的 Update Project 命令计算其他数据。

Step4：双击项目 C 中的 C5（Results）命令，此时进入 ACP（post）后处理平台界面，如图 13-49 所示。

Step5：分别双击左侧树形菜单中的 Solution、Deformation 及 3D Stress 3 个命令。

Step6：双击左侧树形菜单中的 Scene 命令，在弹出的对话框中进行如下设置。

在 General 选项卡中的 Solution 中选择 Solution.1 选项。

勾选 Deformed 选项。

在 Deformation Scale Factor 栏中输入 1.0。

切换到 Contour 选项卡中，在 Definition 栏中选择 Deformation 选项。

其余默认，单击 OK 按钮，如图 13-50 所示。

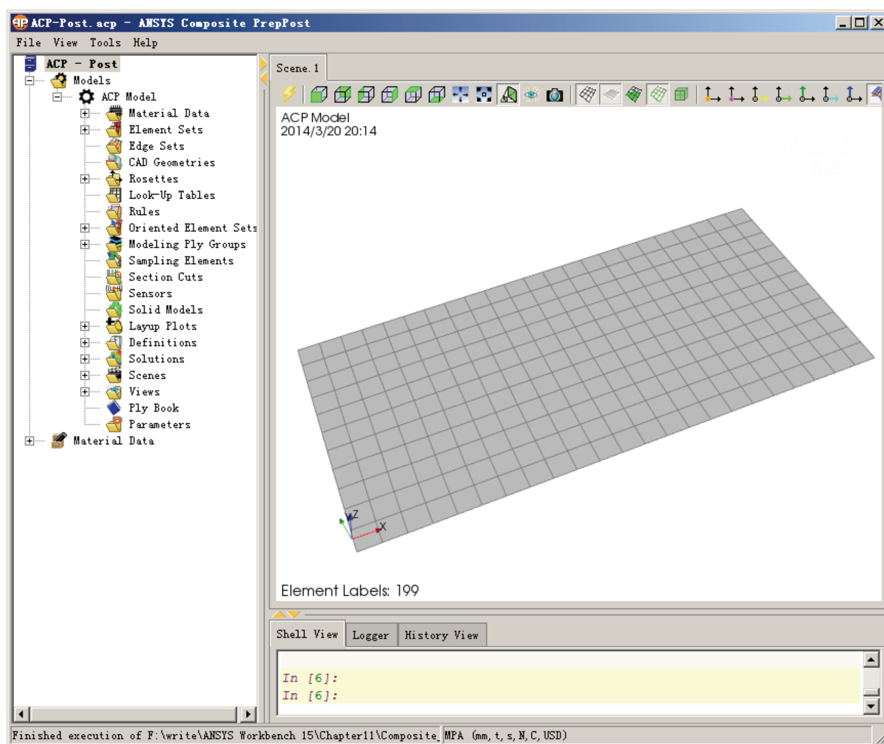
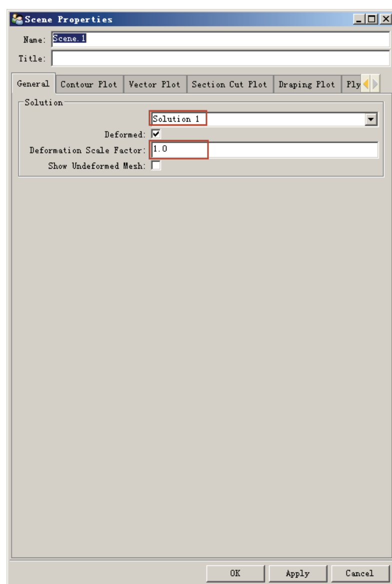


图 13-49　ACP 后处理界面



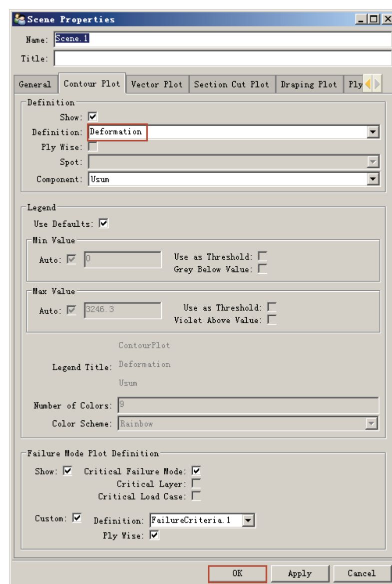


图 13-50　设置输出

Step7： 图 13-51 所示为复合材料变形云图。

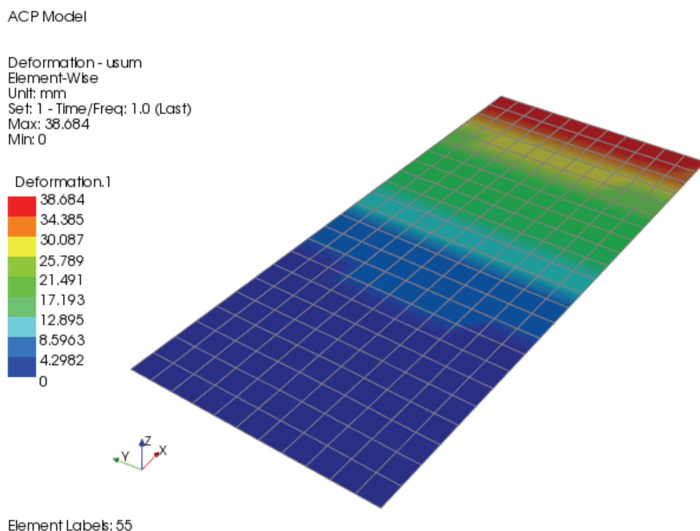


图 13-51　变形云图

13.5.10 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

13.6　本章小结

本章详细介绍了 ANSYS Workbench 16.0 软件复合材料模块 ACP 的前处理及后处理分析功能，包括几何导入、网格划分、层设置、边界条件设定和后处理等操作。

通过本章的学习，读者应该对简单的层压板复合材料分析的过程有详细的了解，由于篇幅限制，本章并未对 ANSYS ACP 模块进行详细讲解，如果读者想深入学习关于 ACP 模块的前后处理详细教程，请参考相关教程。



第14章 疲劳分析

结构失效的一个常见原因是疲劳，与重复加载有关，如长期转动的齿轮，叶轮等，都会存在不同程度的疲劳破坏，轻则是零件损坏，重则会出现生命危险，为了在设计阶段研究零件的预期疲劳程度，通过有限元的方式对零件进行疲劳分析成为必不可少的一环。本章主要介绍 ANSYS Workbench 及 nCode 软件的疲劳分析使用方法，讲解疲劳分析的计算过程。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
疲劳分析应用	√			
疲劳分析意义		√		
ANSYS Workbench 疲劳分析		√	√	√
nCode 疲劳分析			√	√
nCode 材料属性			√	√
nCode 边界条件			√	√
nCode 后处理			√	√

14.1 疲劳分析简介

疲劳失效是一种常见的失效形式，本章通过一个简单的实例讲解了疲劳分析的详细过程和方法。

1．疲劳概述

疲劳通常分为两类：高周疲劳和低周疲劳。高周疲劳是当载荷的循环（重复）次数高（如 1e4 -1e9）的情况下产生的。因此，应力通常比材料的极限强度低，应力疲劳（Stress-based）用于高周疲劳；低周疲劳是在循环次数相对较低时发生的。塑性变形常常伴随低周疲劳，其展现了短疲劳寿命。一般认为应变疲劳（Strain-based）应该用于低周疲劳计算。

在设计仿真中，疲劳模块拓展程序（Fatigue Module add-on）采用的是基于应力疲劳（Stress-based）的理论，它适用于高周疲劳。

2．恒定振幅载荷

在前面曾提到，疲劳是由于重复加载引起的，当最大和最小的应力水平恒定时，称为恒定振幅载荷。反之，则称为变化振幅或非恒定振幅载荷。

3．成比例载荷

载荷可以是比例载荷，也可以非比例载荷。比例载荷是指主应力的比例是恒定的，并且主应力的削减不随时间变化，这实质意味着由于载荷的增加或反作用造成的响应很容易得到计算。相反，非比例载荷没有隐含各应力之间相互的关系，典型情况包括。

- σ1/σ2=constant，如图 14-1 所示。
- 在两个不同载荷工况间的交替变化。
- 交变载荷叠加在静载荷上。
- 非线性边界条件。

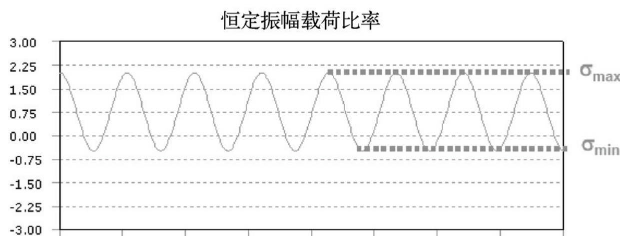


图 14-1　σ1/σ2=constant

4．应力定义

考虑在最大最小应力值 σ_{min} 和 σ_{max} 作用下的比例载荷、恒定振幅的情况：

- 应力范围Δσ 定义为（$\sigma_{max}-\sigma_{min}$）。
- 平均应力 σ_m 定义为（$\sigma_{max}+\sigma_{min}$）/2。
- 应力幅或交变应力 σ_a 是Δσ/2。
- 应力比 *R* 是 $\sigma_{min}/\sigma_{max}$。

当施加的是大小相等且方向相反的载荷时，发生的是对称循环载荷。这就是 $\sigma_m=0$，*R*=−1 的情况。

当施加载荷后又撤除该载荷，将发生脉动循环载荷。这就是 $\sigma_m=\sigma_{max}/2$，*R*=0 的情况。

5．应力-寿命曲线

载荷与疲劳失效的关系，采用的是应力-寿命曲线或 S-N 曲线来表示。

1）若某一部件在承受循环载荷，经过一定的循环次数后，该部件裂纹或破坏将会发展，而且有可能导致失效。

2）如果同个部件作用在更高的载荷下，导致失效的载荷循环次数将减少。

3）应力-寿命曲线或 S-N 曲线，展示出应力幅与失效循环次数的关系。

S-N 曲线是通过对试件做疲劳测试得到的弯曲或轴向测试，反映的是单轴的应力状态，影响 S-N 曲线的因素很多，其中的一些需要注意，具体如下。

材料的延展性、材料的加工工艺、几何形状信息（包括表面光滑度、残余应力以及存在的应力集中）、载荷环境（包括平均应力、温度和化学环境）。

例如，压缩平均应力比零平均应力的疲劳寿命长，相反，拉伸平均应力比零平均应力的疲劳寿命短，对压缩和拉伸平均应力，平均应力将分别提高和降低 S-N 曲线。

因此，记住以下几点：一个部件通常经受多轴应力状态。如果疲劳数据（S-N 曲线）是从反映单轴应力状态的测试中得到的，那么在计算寿命时就要注意：

1）设计仿真为用户提供了如何把结果和 S-N 曲线相关联的选择，包括多轴应力的选择。

2）双轴应力结果有助于计算在给定位置的情况。

平均应力影响疲劳寿命，并且变换在 S-N 曲线的上方位置与下方位置（反映出在给定应力幅下的寿命长短）：

1）对于不同的平均应力或应力比值，设计仿真允许输入多重S-N曲线（实验数据）。

2）如果没有太多的多重 S-N 曲线（实验数据），那么设计仿真也允许采用多种不同的平均应力修正理论。

早先曾提到影响疲劳寿命的其他因素，也可以在设计仿真中可以用一个修正因子来解释。

6. 总结

疲劳模块允许用户采用基于应力理论的处理方法来解决高周疲劳问题。以下情况可以用疲劳模块来处理。

- 恒定振幅，比例载荷。
- 变化振幅，比例载荷。
- 恒定振幅，非比例载荷。

需要输入的数据是材料的S-N曲线：

S-N 曲线是疲劳实验中获得，而且可能本质上是单轴的，但在实际的分析中，部件可能处于多轴应力状态。

S-N 曲线的绘制取决于许多因素，包括平均应力，在不同平均应力值作用下的 S-N 曲线的应力值可以直接输入，或可以执行通过平均应力修正理论实现。

14.2 疲劳分析方法

在疲劳仿真分析中，ANSYS 疲劳模块程序采用的是基于应力疲劳的理论，它适用于高周疲劳。接下来介绍一下如何对基于应力疲劳理论的问题进行处理。

14.2.1 疲劳程序

进行疲劳分析是基于线性静力分析的，所以不需对所有的步骤进行详尽阐述。疲劳分析是在线性静力分析完成之后，通过设计仿真自动执行的。

注：1）对疲劳工具的添加，无论在求解之前还是计算之后，都没有关系，因为疲劳计算过程与应力分析过程是相互独立的。

2）尽管疲劳与循环或交变载荷有关，但使用的结果却基于线性静力分析，而不是谐分析。尽管在模型中也可能存在非线性，但在处理时就要谨慎了，因为疲劳分析是假设线性行为的。

ANSYS Workbench 平台的疲劳计算目前还不能支持线体模型输出应力结果，所以疲劳计算对于线体是忽略的。但是线体仍然可以包括在模型中以给结构提供刚性，但在疲劳计算时并不参与计算。

由于有线性静力分析，所以需要用到弹性模量（杨氏模量）和泊松比，如果有惯性载荷，则需要输入质量密度；如果有热载荷，则需要输入热膨胀系数和热传导率；如果使用应力工具结果，那么就需要输入应力极限数据，而且这个数据也用于疲劳分析中的平均应力修正。

疲劳分析模块也需要使用到在工程数据分支下的材料特性当中的 S-N 曲线数据，数据类型在“疲劳特性”下会说明；S-N 曲线数据是在材料特性分支下的“交变应力-循环”选项中输入的，如果用于不同的平均应力或应力比的情况，需要输入多重S-N曲线数据到程序。

14.2.2 应力寿命曲线

载荷与疲劳失效的关系，采用的是应力-寿命曲线或 S-N 曲线（见图 14-2）来表述，以下 3 种情况需要用到应力-寿命曲线表述：

1）如果某一部件承受循环载荷，经过一定的循环次数后，该部件由于断裂或者损伤而发生失效。

2）如果同一个部件在更高的载荷下，导致失效的循环次数将减少。

3）应力-寿命曲线或者 S-N 曲线展示了应力幅与失效循环次数的关系。

4）应力-疲劳曲线或者 S-N 曲线是通过对试件做疲劳试验得到的数据，弯曲或者轴向测试反映的是单轴的应力状态。

影响 S-N 曲线的因素有很多，其中一些需要注意的事项如下。

1）材料的延展性，材料的加工工艺。

2）几何形状信息，包括表面粗糙度、残余应力以及存在的应力集中。

3）载荷环境，包括平均应力、温度和化学环境，如压缩平均应力比零平均应力的疲劳寿命长；相反，拉伸应力比零平均应力的疲劳寿命短；对压缩和拉伸平均应力，平均应力将分别提高和降低 S-N 曲线。

因此，一个部件通过经受多轴应力状态，如果疲劳寿命是从反映单轴应力状态的测试中得到的，那么在计算寿命时就要注意，设计仿真为用户提供了如何把 S-N 曲线结果向多轴应力修正；双轴应力结果有助于计算在给定位置的情况。

平均应力影响疲劳寿命，并且变换在 S-N 曲线的上下移动（反映出在给定应力幅下的寿命长短），对于不同的平均应力和应力比值，仿真允许输入多重 S-N（实验数据）；如果没有太多的多重 S-N 曲线（实验数据），那么仿真也允许采用多种不同的平均应力修正理论。

早先曾提到影响疲劳寿命的其他因素，也可以在仿真中用一个修正因子加以考虑。

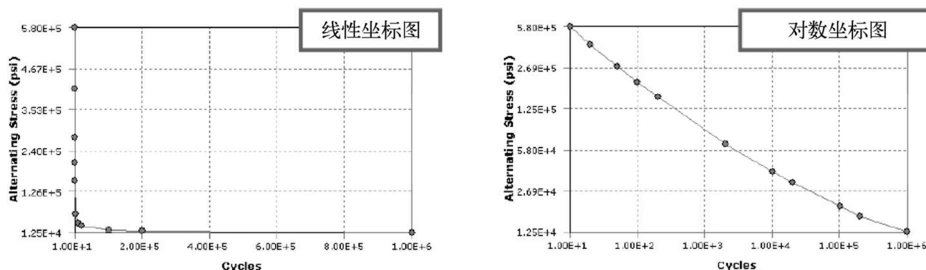


图 14-2　应力疲劳曲线

14.2.3 疲劳材料特性

在材料特性的工作表中，可以定义下列输入类型的 S-N 曲线：插入的图标可以是线性的、半对数的或双对数曲线 3 种，S-N 曲线与平均应力有关。如果 S-N 曲线用于不同的平均应力情况，需要输入多重 S-N 曲线，每个 S-N 曲线可以在不同平均应力下输入，也可以在不同应力比下输入。

多重 S-N 曲线可以通过右键单击 Mean Value 栏进行添加，并指定相应的平均应力数

值，每个平均应力对应一个交变应力数表，如图 14-3 所示。

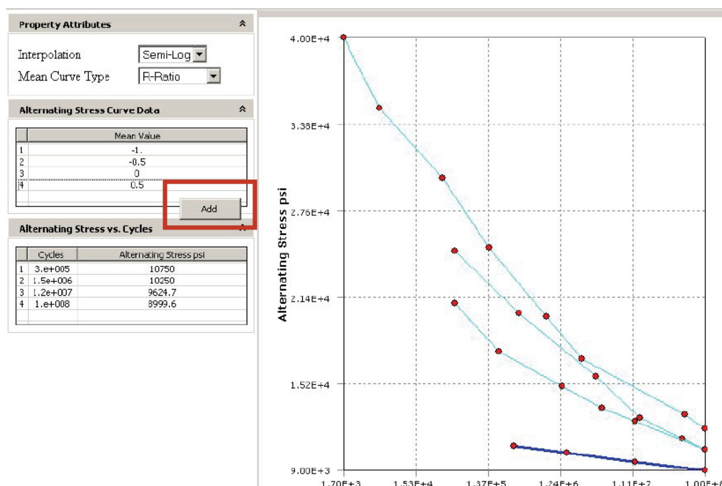


图 14-3　多重 S-N 曲线

14.3　疲劳分析实例 1——前桥疲劳分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 静态力学分析模块的疲劳分析功能，计算模型在外荷载下的寿命周期与安全系数等。

学习目的：熟练掌握 ANSYS Workbench 静态力学分析模块的疲劳分析功能的方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter14\char14-1Geom.stp
结果文件	网盘\Chapter14\char14-1\ Fatigue.wbpj

14.3.1 问题描述

如图 14-4 所示的前桥模型，请用 ANSYS Workbench 分析模型的位移与应力分布，假设外载荷 F=18750N，分析其疲劳特性。

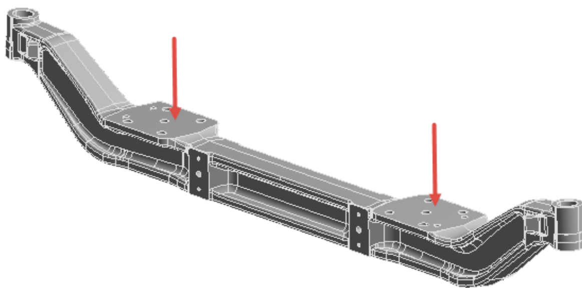


图 14-4　前桥模型

14.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 14-5 所示。

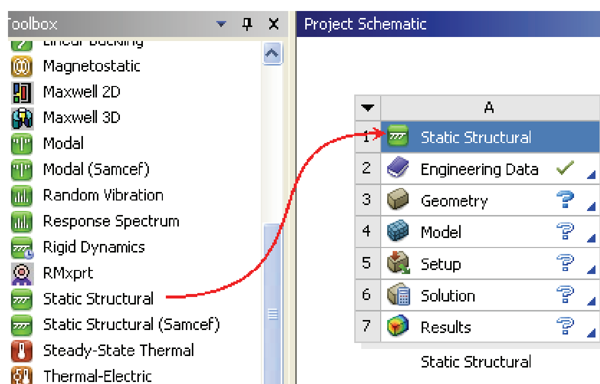


图 14-5　创建分析项目 A

14.3.3 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 14-6 所示，此时会弹出“打开”对话框。

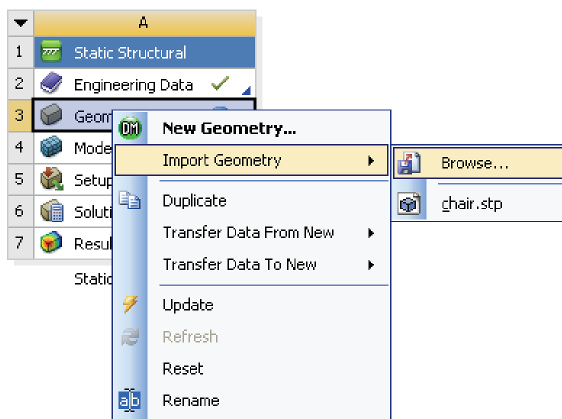


图 14-6　导入几何体

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 Geom.stp 几何体文件，如图 14-7 所示，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，此时设计树

中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 14-8 所示。

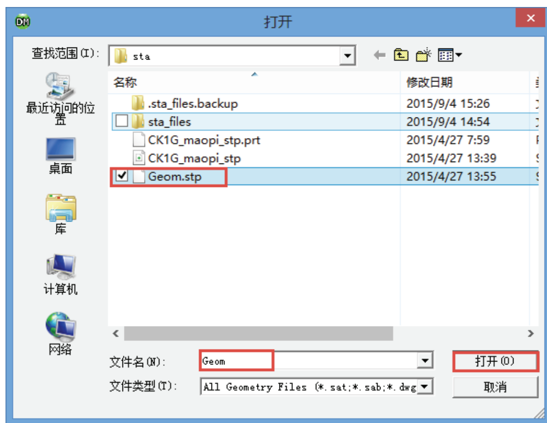


图 14-7 “打开”对话框

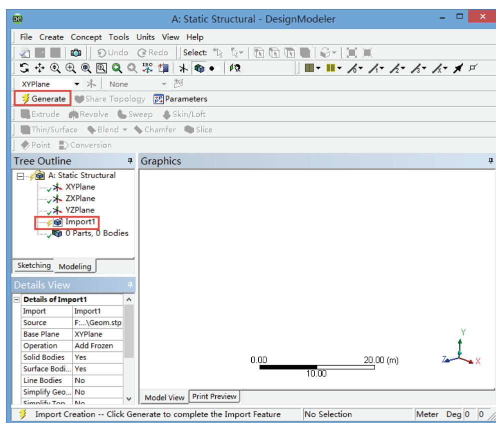


图 14-8 生成前的 DesignModeler 界面

Step4： 单击⚡Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 14-9 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无须进行操作。

Step5： 单击 DesignModeler 界面右上角的❌（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

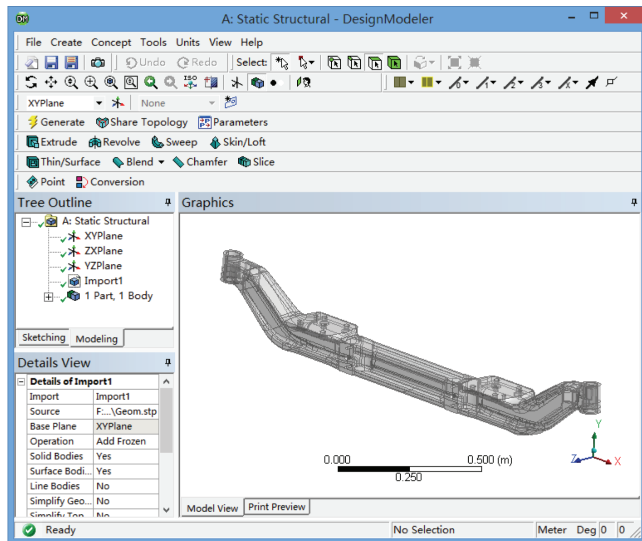


图 14-9 生成后的 DesignModeler 界面

14.3.4 添加材料库

Step1： 双击项目 A 中的 A2Engineering Data 项，进入图 14-10 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

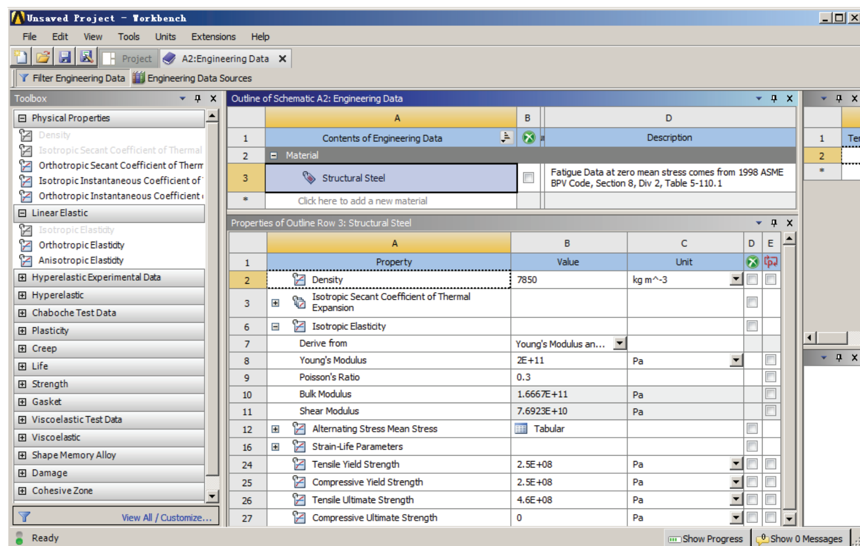


图 14-10 材料参数设置界面

Step2：通过在 Properties of Outline Row3：Structural Steel 选项中的 B12 项，在图表右侧弹出图 14-11 所示的循环次数和应力值曲线。

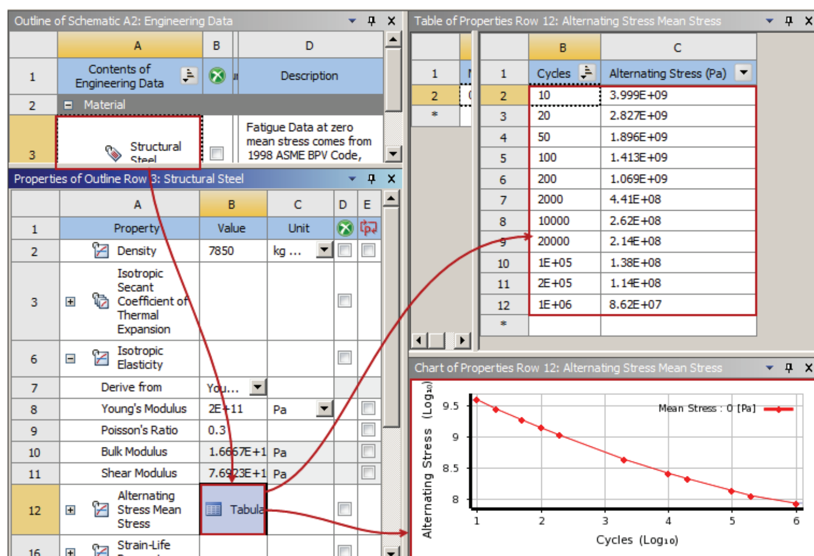


图 14-11 循环次数和应力值曲线

Step3：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

14.3.5 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 14-12 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→solid 选项，此时可以看出在 Details of“solid”（参数列表）中模型的默认材料为 Structural Steel，如图 14-13 所示。

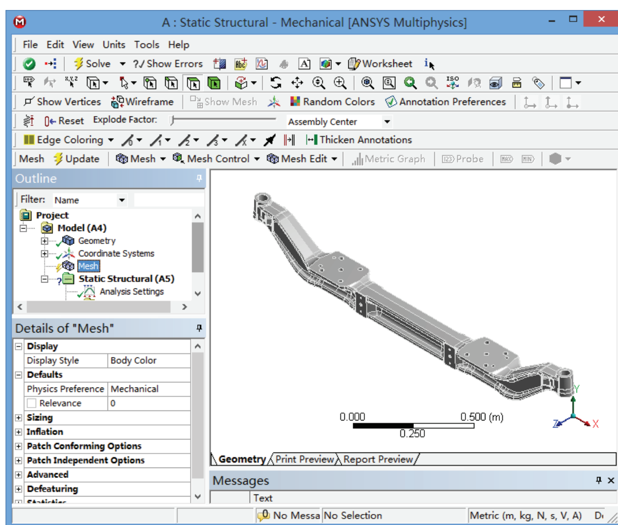


图 14-12 Mechanical 界面

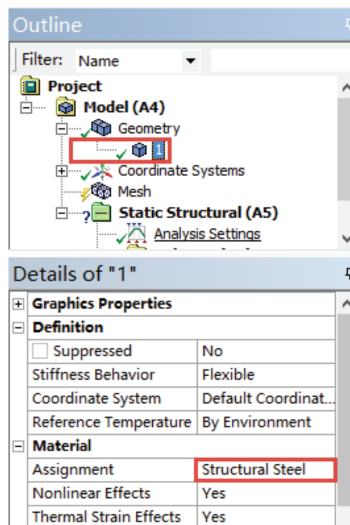


图 14-13 默认材料

14.3.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of“Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例中在 Sizing 中的 Element Size 中设置为 0.05m，其余采用默认设置，如图 14-14 所示。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 14-15 所示。

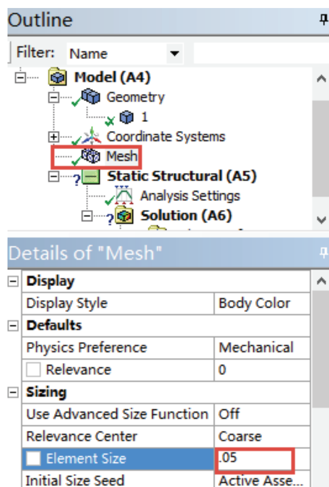


图 14-14 生成网格

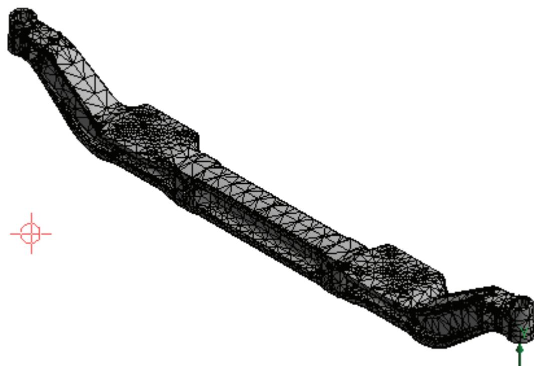


图 14-15 网格划分效果

14.3.7 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A5）选项，此时会出现图 14-16 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 14-17 所示。

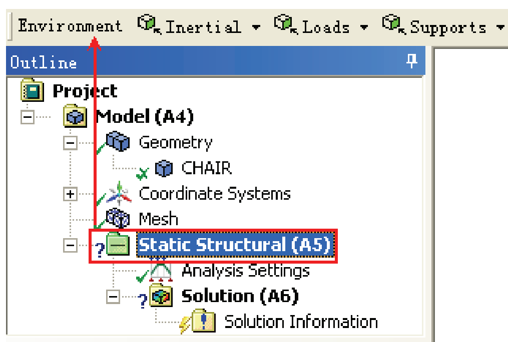


图 14-16 Environment 工具栏

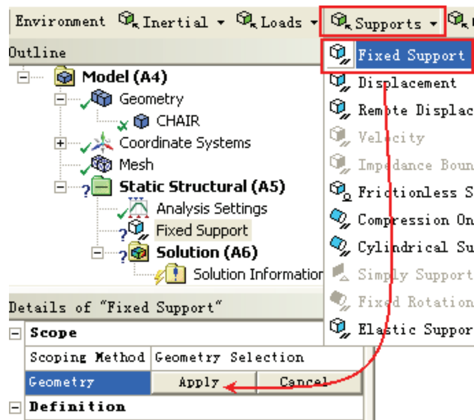


图 14-17 添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Static Structural（A5）”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 14-18 所示。

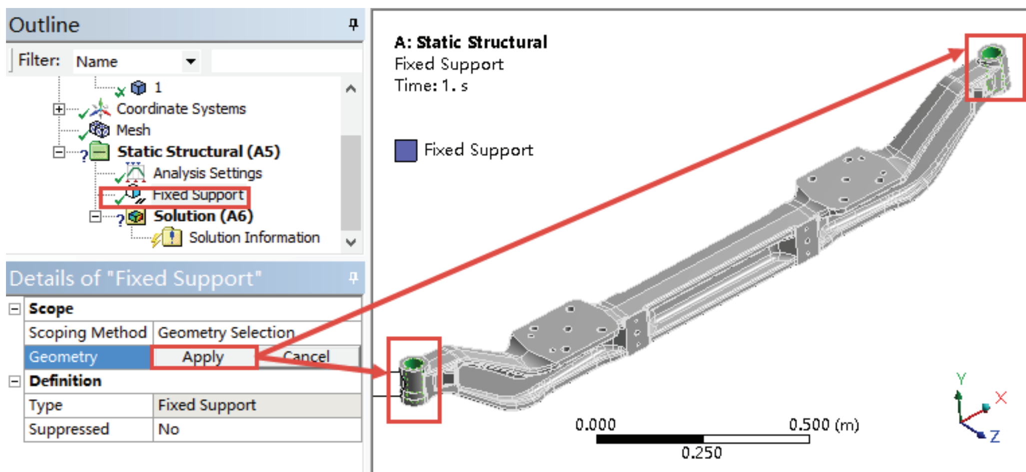


图 14-18 施加固定约束

Step4：如同 Step2，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 14-19 所示。

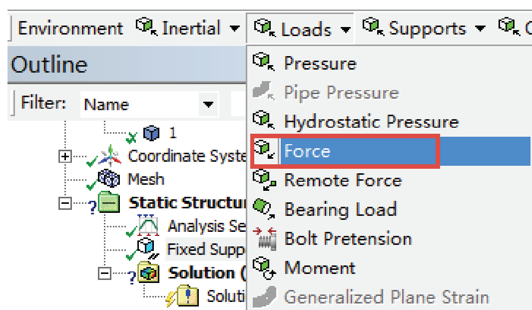


图 14-19 添加力

Step5：如同 Step3，选中 Force 选项，选择需要施加压力的面，单击 Details of “Static Structural（A5）”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，同时在 Magnitude 选项下设置力为 18750N 的面载荷，如图 14-20 所示。

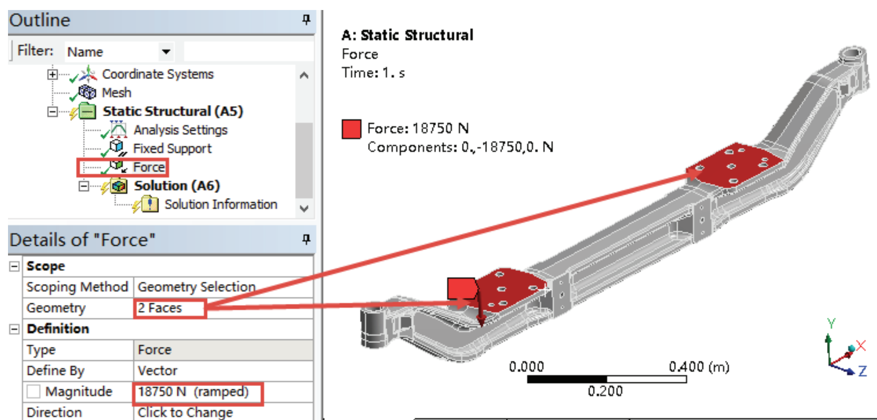


图 14-20 添加面载荷

Step6：在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 14-21 所示。

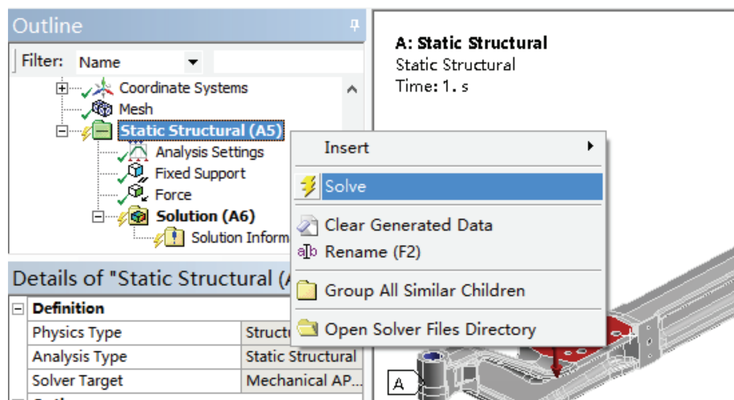


图 14-21 求解

14.3.8 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 14-22 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 14-23 所示。

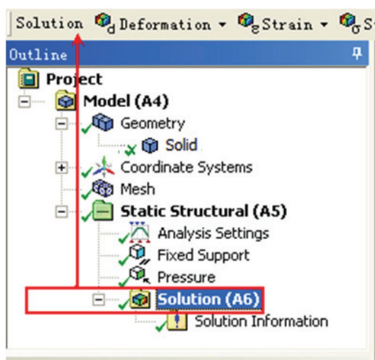


图 14-22 Solution 工具栏

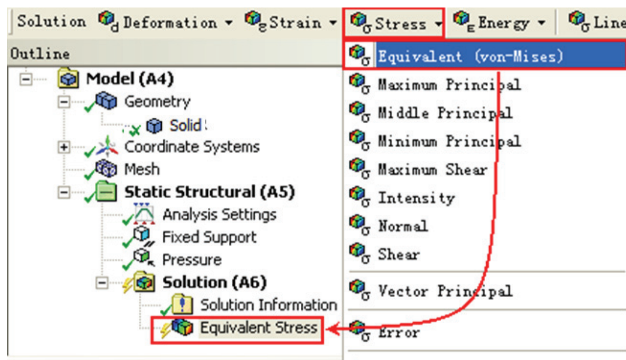


图 14-23 添加等效应力选项

Step3：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 14-24 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

Step4：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 14-25 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

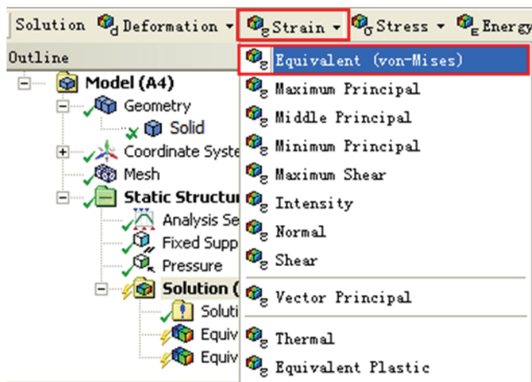


图 14-24 添加等效应变选项

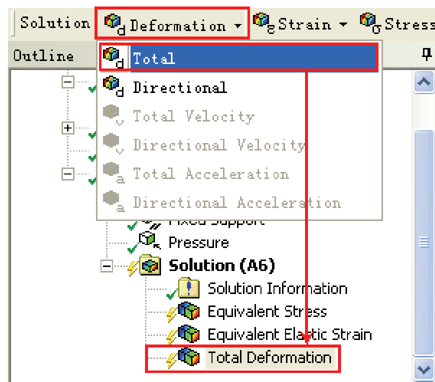


图 14-25 添加总变形选项

Step5：在 Outlines（分析树）中的 Solution（A6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 14-26 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

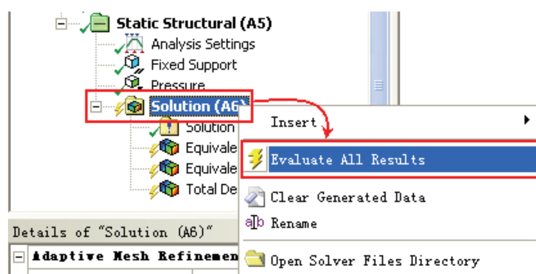


图 14-26 快捷菜单

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Stress 选项，此时会出现图 14-27 所示的应力分析云图。

Step7：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Elastic Strain 选项，此时会出现图 14-28 所示的应变分析云图。

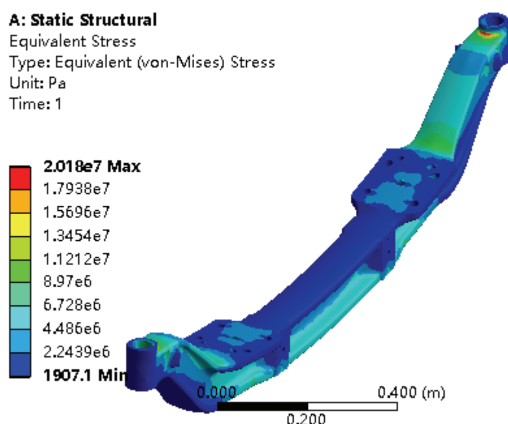


图 14-27 应力分析云图

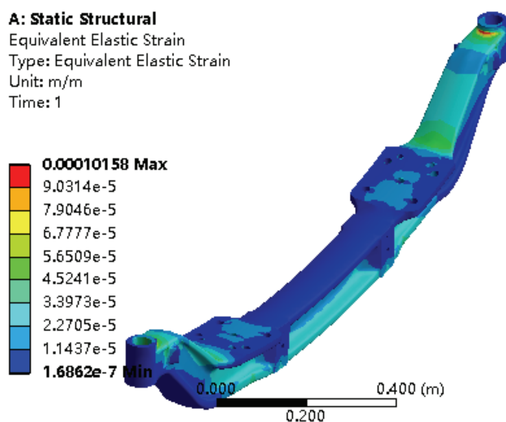


图 14-28 应变分析云图

Step8：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形），此时会出现图 14-29 所示的总变形分析云图。

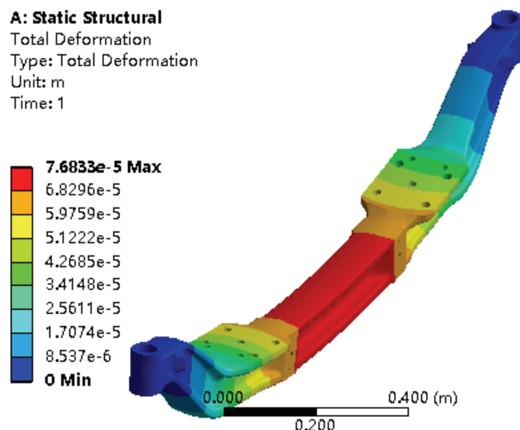


图 14-29 总变形分析云图

14.3.9 保存工程文件

Step1：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save As... （另存为）按钮，如图 14-30 所示，保存文件名为 Fatigue.wbpj。

Step2：双击项目 A 中的 A7（Result）栏，此时会进入 Mechanical 平台。

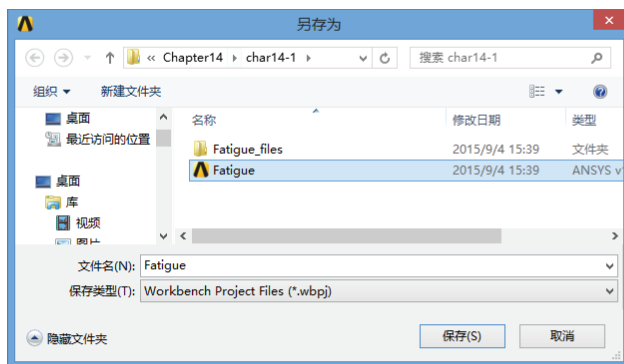


图 14-30 保存文件

14.3.10 添加疲劳分析选项

Step1：右键单击 Solution（A6），此时会弹出图 14-31 所示快捷菜单，在快捷菜单中依次选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool 命令。

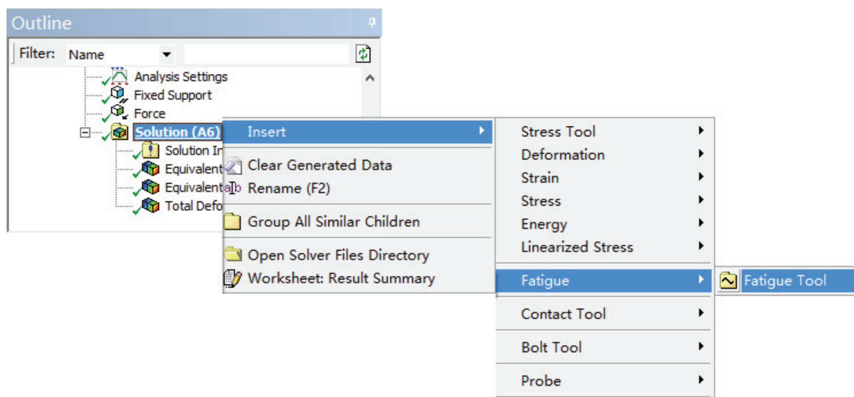


图 14-31 添加屈服分析选项

Step2：单击 Fatigue Tool 命令，如图 14-32 所示，在下面出现的 Details of “Fatigue Tool”面板中进行如下设置。

在 Fatigue Strength Factor 栏中将数值更改为 0.8。

在 Type 栏中选择 Fully Reserved 选项。

在 Analysis Type 中选择 Stress Life 选项。

在 Stress Component 栏中选择 Equivalent（von Mises）选项。

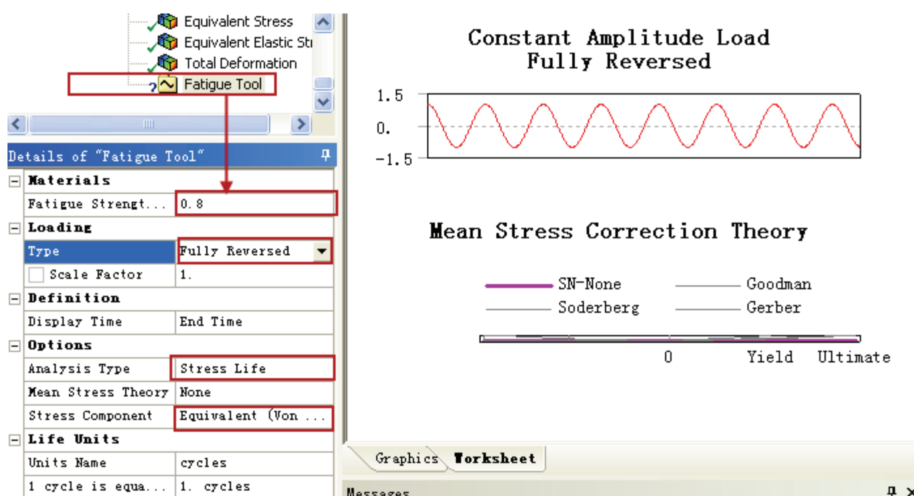


图 14-32 疲劳设置

Step3：右键单击 Fatigue Tool 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Life 命令，如图 14-33 所示。

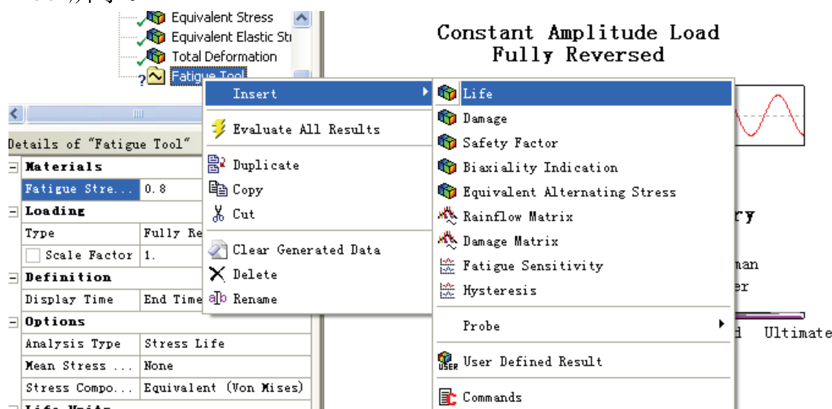


图 14-33 添加 Life 命令

Step4：同样操作，可以在 Fatigue Tool 中添加 Safety Factor、Fatigue Sensitivity 两个命令。

Step5：右键单击 Fatigue Tool 命令，此时在弹出的图 14-34 所示的快捷菜单中选择 Evaluate All Result 命令。

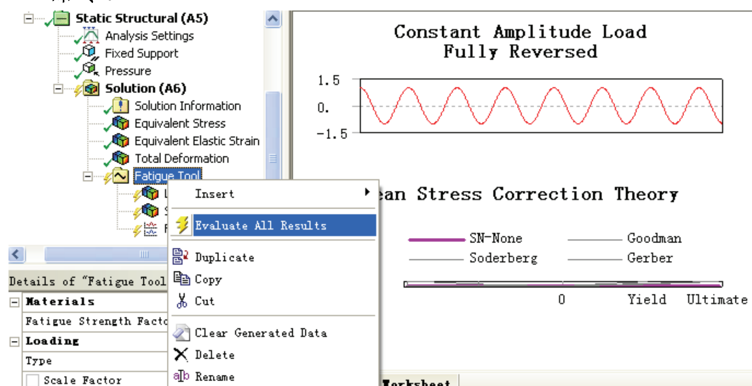


图 14-34 结果后处理

Step6：图 14-35 所示为疲劳寿命显示云图。

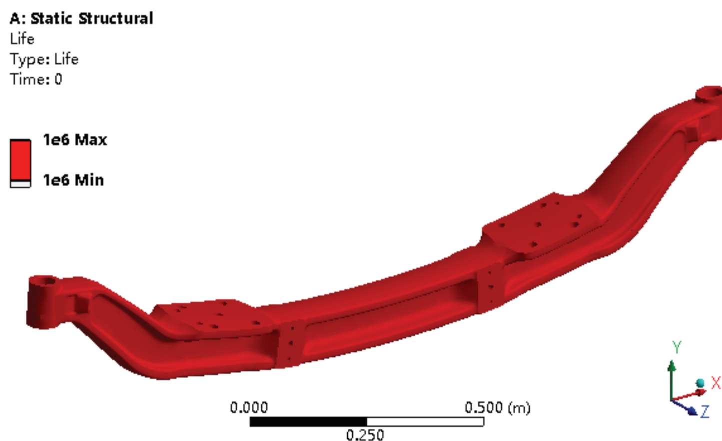


图 14-35　疲劳寿命云图显示

Step7：如图 14-36 所示为安全因子显示云图。

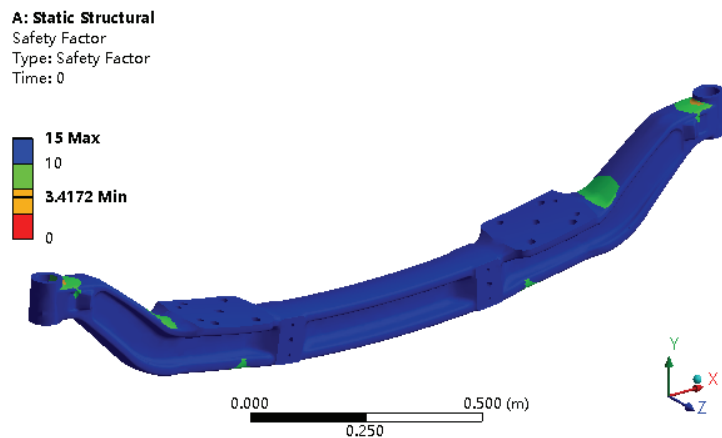


图 14-36　安全因子云图显示

14.3.11 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

本节通过一个简单的例子介绍了疲劳分析的简单过程，在疲劳分析过程中最重要的是材料关于疲劳的属性设置，如图 14-37 所示的材料属性列表，图 14-38 所示为材料疲劳分析相关曲线值。

Properties of Outline Row 4: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
9	Poisson's Ratio	0.3			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa		
19	Strength Exponent	-0.106			
20	Ductility Coefficient	0.213			
21	Ductility Exponent	-0.47			
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

图 14-37　疲劳分析属性

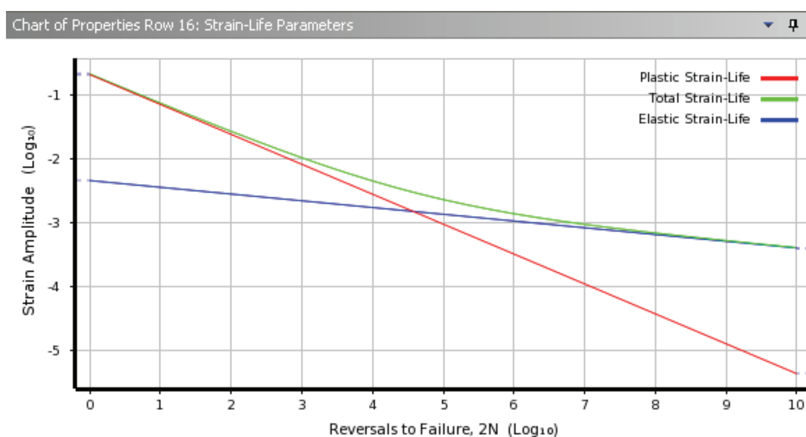


图 14-38　材料疲劳分析相关寿命曲线

在工程中使用疲劳分析时，需要对材料的以上数据进行试验取得。本章节案例仅仅使用软件自带的材料进行疲劳分析。

14.4　疲劳分析实例 2——实体疲劳分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的静态力学分析模块的疲劳分析功能，计算实体在外荷载下的寿命周期与安全系数等。

注：本案例需要用到 nCode 软件，请读者使用前预先授权安装 nCode 软件。

学习目标：掌握 ANSYS Workbench 静态力学分析模块与 nCode 模块疲劳分析的一般方法方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter14\char14-2\ConRod.x_t
结果文件	网盘\Chapter14\char14-2\ConRod_nCode.wbpj

14.4.1 问题描述

如图 14-39 所示的模型，请用 nCode 分析进行疲劳分析。

14.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1： 在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2： 双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 14-40 所示。

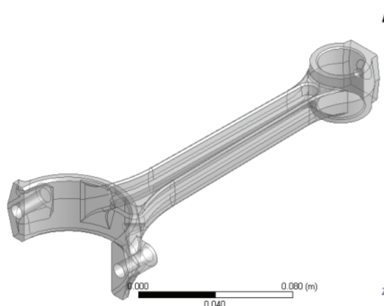


图 14-39　模型

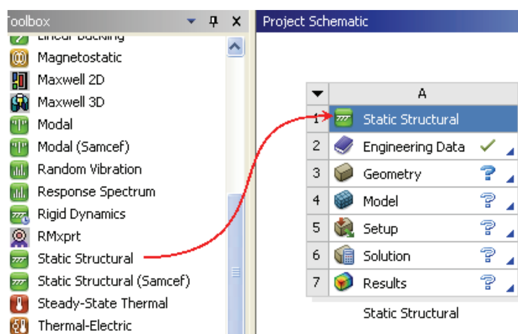


图 14-40　创建分析项目 A

14.4.3 导入创建几何体

Step1： 在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 14-41 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2： 在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 shaft.agdb 几何体文件，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

Step3： 双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，轴几何模型如图 14-42 所示。

Step4： 单击 DesignModeler 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

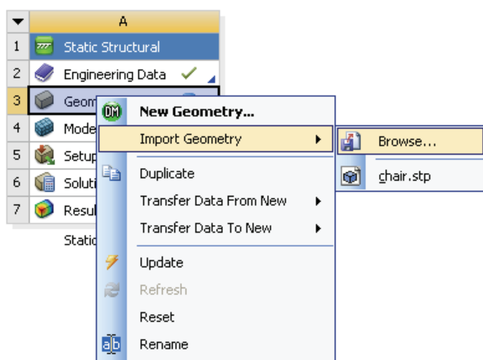


图 14-41　导入几何体

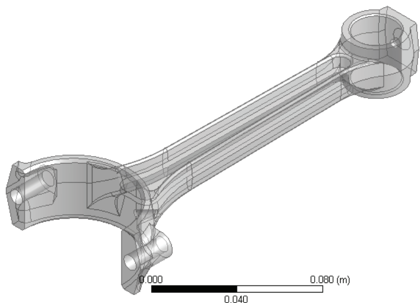


图 14-42　几何模型

14.4.4 添加材料库

本算例材料使用的 Carbon Steel SAE1045_shaft 材料在 Code 软件材料库中。

14.4.5 添加模型材料属性

双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 项，进入图 14-43 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

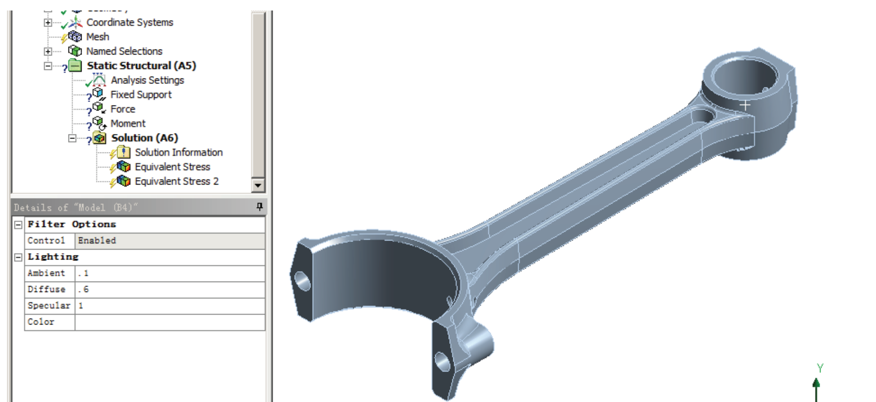


图 14-43　Mechanical 界面

14.4.6 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，本例中在 Sizing 中的 Relevance Center 中选择 Medium，如图 14-44 所示，其余采用默认设置。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 14-45 所示。

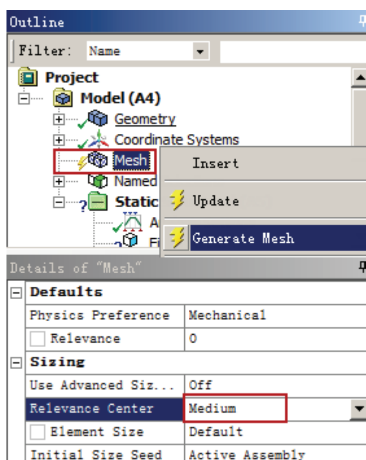


图 14-44　生成网格设置

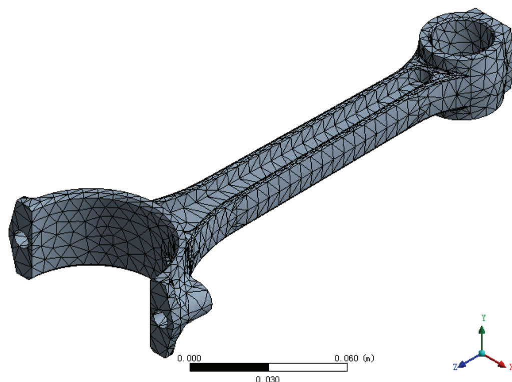


图 14-45　网格划分效果

14.4.7 施加载荷与约束

Step1：添加一个固定约束，如图 14-46 所示，选择加亮面。

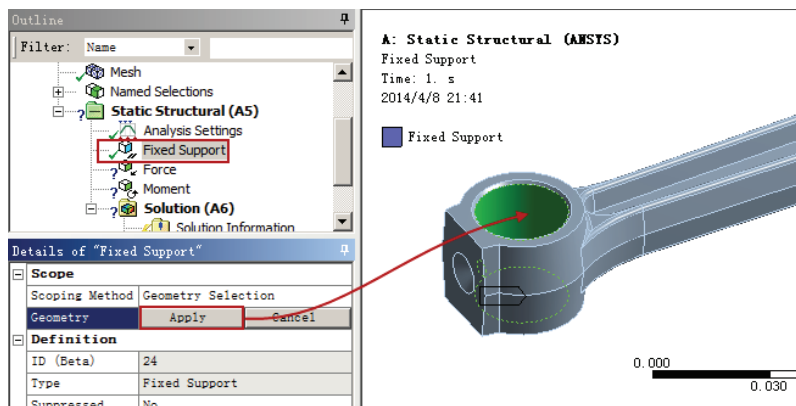


图 14-46 添加固定约束

Step2：在另外一端加亮面上施加载荷 Force，载荷大小见表 14-1，具体操作过程如图 14-47 所示。

表 14-1 载荷步 1

Steps	Time	X	Y	Z
1	0	0	0	0
1	1	0	1	0
2	2	0	0	0

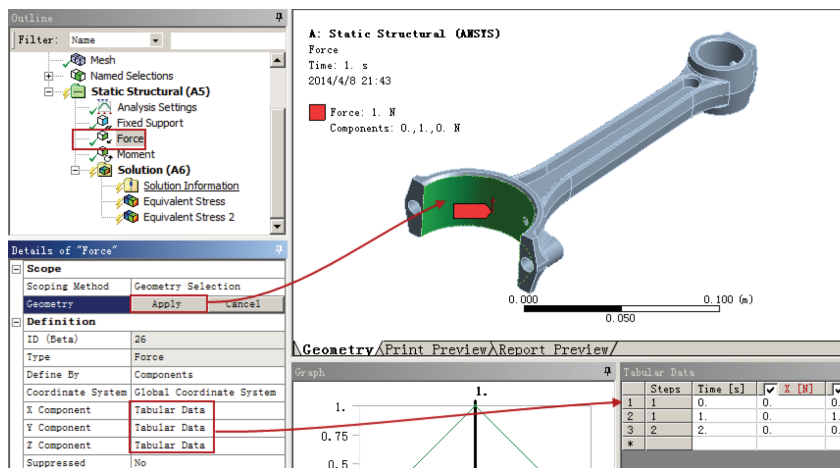


图 14-47 施加载荷

Step3：如同 Step2，添加一个力矩载荷，转矩大小如表 14-2 所示，具体操作过程如

图 14-48 所示。

表 14-2　载荷步 2

Steps	Time	X	Y	Z
1	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	2	1	0	0

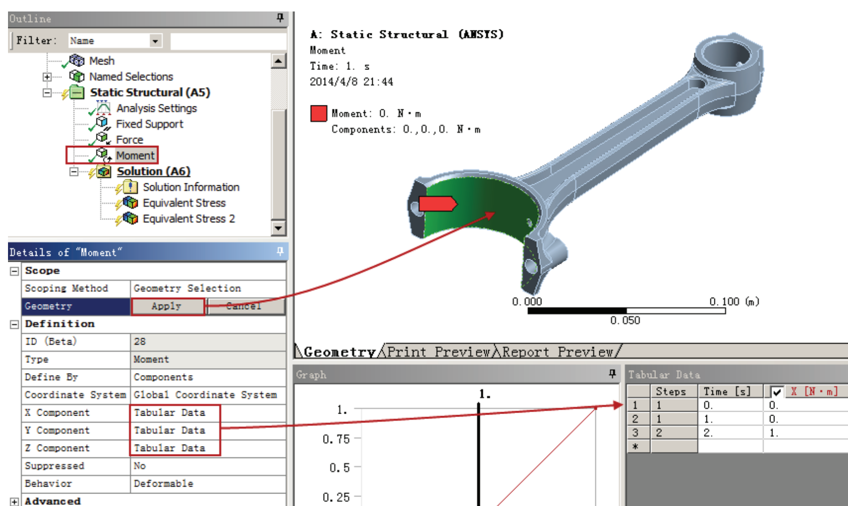


图 14-48　施加载荷

Step4： 在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（A5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

14.4.8 结果后处理

Step1： 等效应力云图如图 14-49 所示。

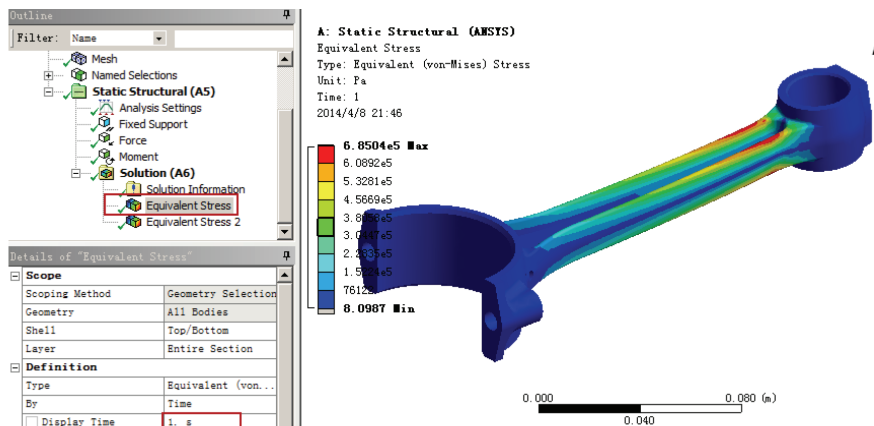


图 14-49　等效应力云图

Step2： 图 14-50 所示是在力矩作用下的应力分析云图。

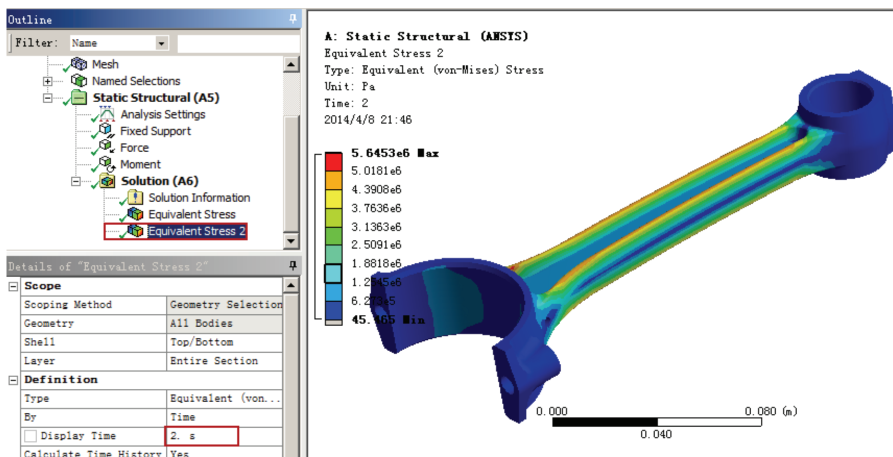


图 14-50　应力分析云图

14.4.9 保存文件

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，在文件名中输入 ConRod_nCode.wbpj 保存包含有分析结果的文件。

14.4.10 启动 nCode 程序

Step1： 选择 Mechanical 平台中左侧的 Toolbox→Analysis Systerm→nCode EN TimeSeries（DesignLife）选项，直接拖拽到 A6（Solution）中，如图 14-51 所示。

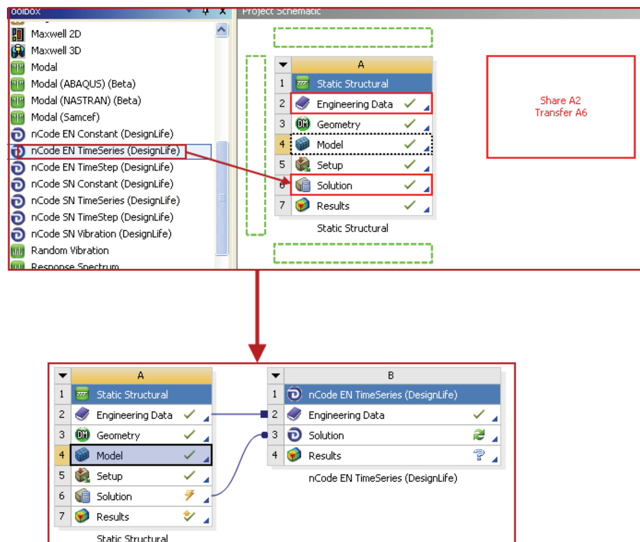


图 14-51　启动 nCode 程序

Step2： 右键单击 A7（Results）栏，在弹出的菜单中选择 Update 选项，进行计算。

Step3： 双击 B3（Solution）栏，进入 nCode 平台，如图 14-52 所示。

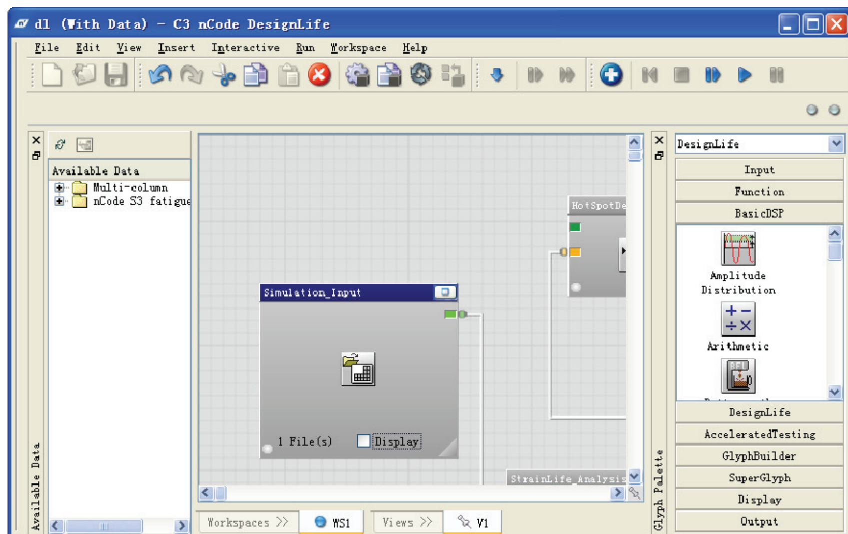


图 14-52 nCode 平台

Step4： 单击 file 菜单中的 Open Data Files…按钮，在弹出的图 14-53 所示的对话框中单击 Browse 按钮，在弹出的 Select Folder 对话框中选择载荷所在文件夹，并单击 OK 按钮。

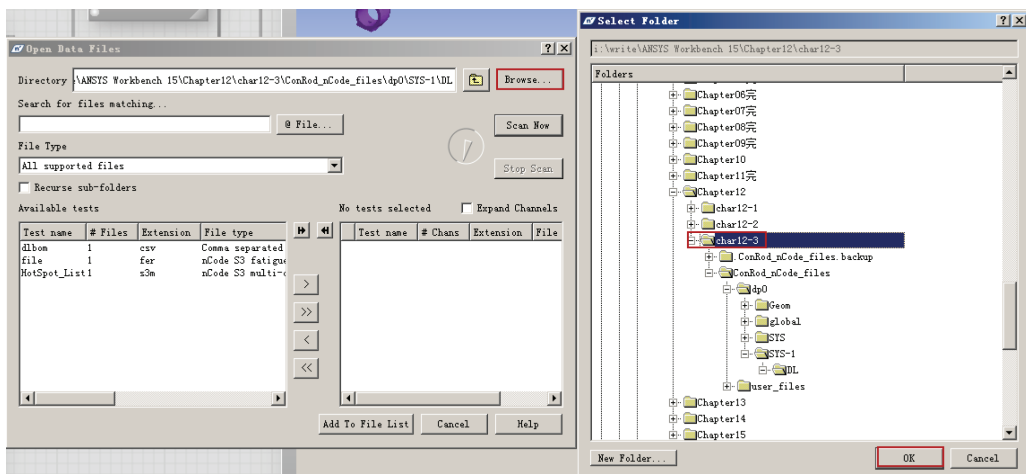


图 14-53 选择载荷

Step5： 单击 Open Data Files 对话框中的 Scan Now 按钮，此时载荷文件被读入到 Available Tests 栏中，然后单击 按钮，使载荷文件移动到右侧栏中，并单击下面的 Add To File List 按钮，如图 14-54 所示的操作。

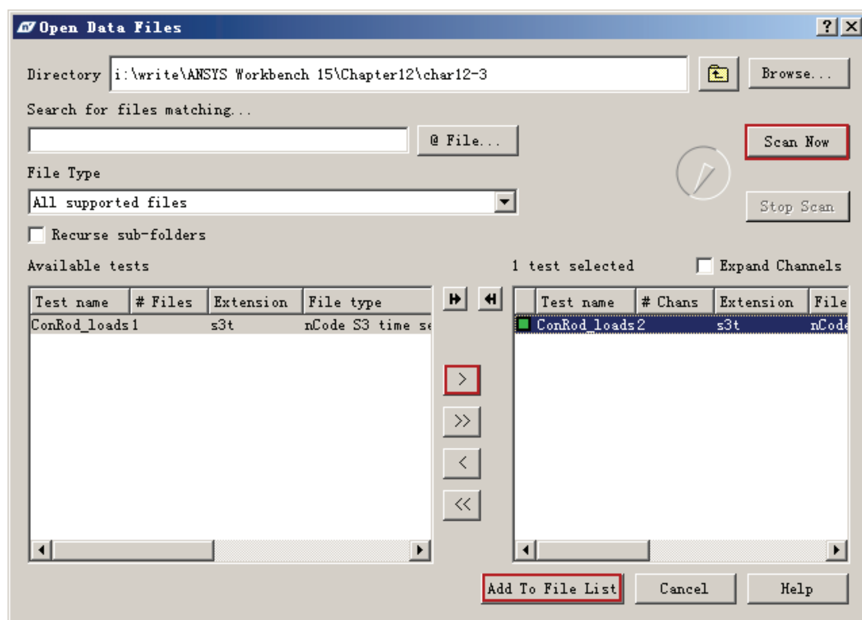


图 14-54　加载载荷

14.4.11 疲劳分析

Step1： 勾选图 14-55 中的 Display 选项，此时几何图形会显示在图框中。

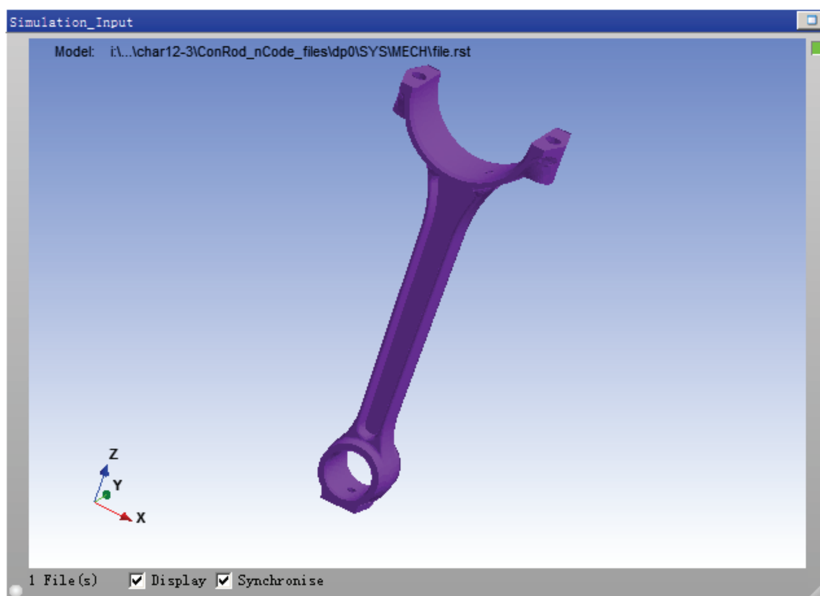


图 14-55　示几何图形

Step2： 右键单击 StrainLife_Analysis 选项，在弹出的图 14-56 所示的快捷菜单中选择

Edit Loading Mapping 命令。

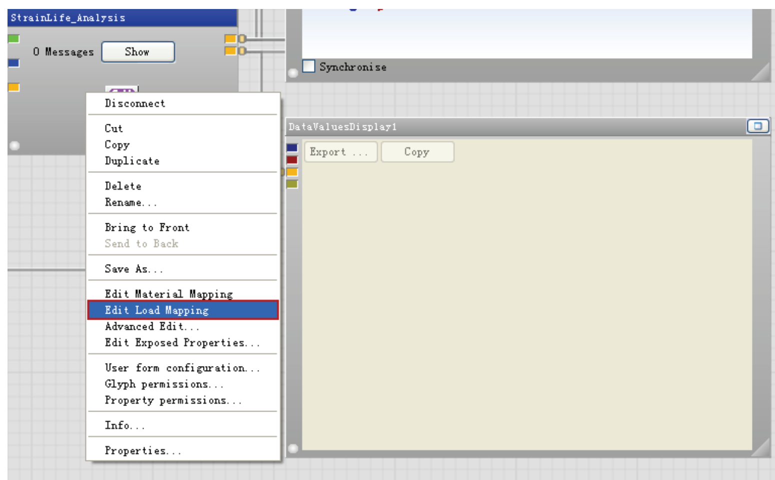


图 14-56 映射载荷

Step3： 此时加载的时间载荷如图 14-57 所示。

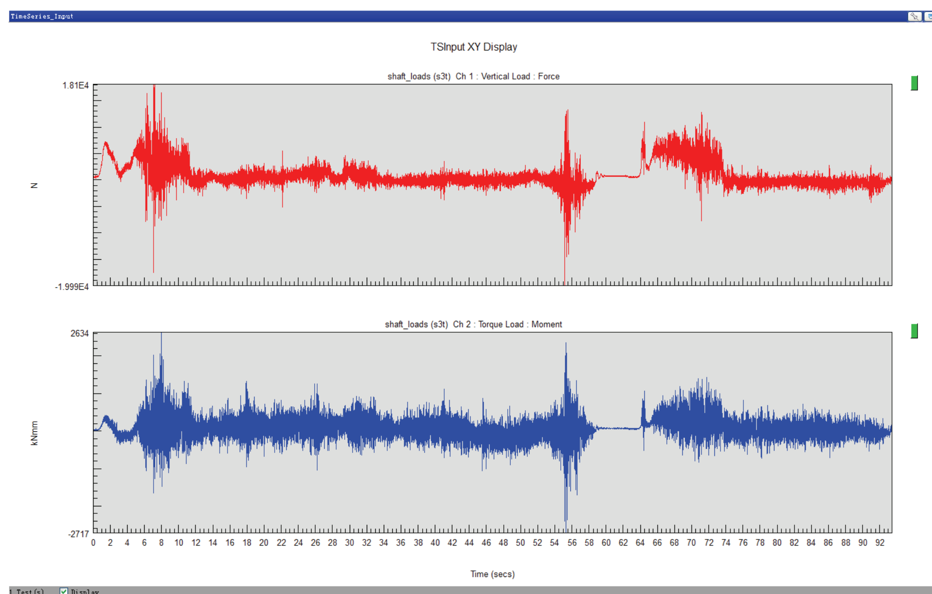


图 14-57 载荷序列

Step4： 单击工具栏中的 ▶ 按钮开始计算。

Step5： 计算完成后如图 14-58 所示，此图中包含几何模型、载荷序列、结果云图、结果数据及它们之间的关系线。

Step6： 关闭 nCode 软件，返回到 Workbench 平台。

Step7： 双击项目 B 中的 B4（Results），此时弹出图 14-59 所示的结果云图。

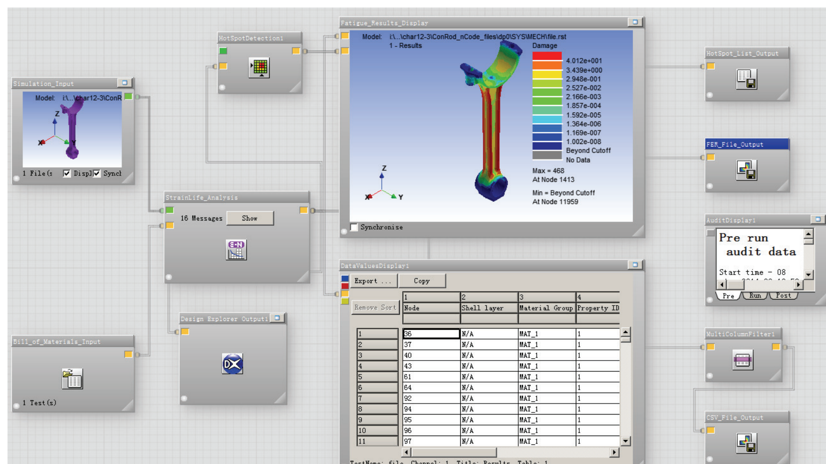


图 14-58　计算结果及云图

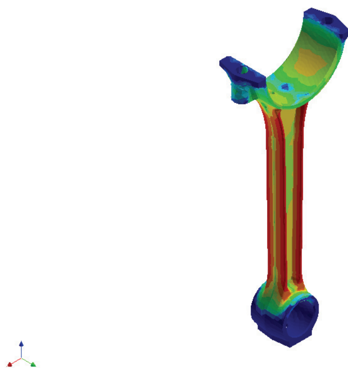


图 14-59　后处理结果云图

14.4.12 保存与退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3： 单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

14.5　本章小结

本章通过两个简单的例子分别介绍了 Workbench 平台及 nCode 平台疲劳分析的简单过程，在疲劳分析过程中最重要的是材料关于疲劳的属性设置。

另外，本章以 Workbench 平台的静力学分析为依据，利用 nCode 软件的疲劳分析功能对板进行疲劳分析，分析得到了板的破坏分布云图。



第15章 压 电 分 析

本章首先对压电材料的概念进行简要的介绍，并通过一个典型案例详细讲解了压电分析及逆压电分析的操作步骤。

ANSYS Workbench 16.0 平台最大的亮点在于 Extension 模块的引入，通过 Extension 模块，用户可以完成一些非常规的计算与希望得到的参数。

学习目标 知识点	了 解	理 解	应 用	实 践
Extension 模块的安装方法		√	√	√
压电材料的概念及分类			√	√
压电材料的应用			√	√
压电材料的主要参数			√	√
压电分析操作过程			√	√

15.1 压电材料基本知识

压电材料是指可以将压强、振动等应力应变迅速转变为电信号，或将电信号转变为形变、振动等信号的机电耦合的功能材料。

15.1.1 压电材料的概念

当你在点燃煤气灶或热水器时，就有一种压电陶瓷已悄悄地为你服务了一次。生产厂家在这类压电点火装置内，藏着一块压电陶瓷，当用户按下点火装置的弹簧时，传动装置就把压力施加在压电陶瓷上，使它产生很高的电压，进而将电能引向燃气的出口放电。于是，燃气就被电火花点燃了。压电陶瓷的这种功能就叫做压电效应。压电效应的原理是，如果对压电材料施加压力，它便会产生电位差（称之为正压电效应），反之施加电压，则产生机械应力（称为逆压电效应）。如果压力是一种高频振动，则产生的就是高频电流。而高频电信号加在压电陶瓷上时，则产生高频声信号（机械振动），这就是我们平常所说的超声波信号。也就是说，压电陶瓷具有机械能与电能之间的转换和逆转换的功能，这种相互对应的关系确实非常有意思。

压电材料可以因机械变形产生电场，也可以因电场作用产生机械变形，这种固有的机-电耦合效应使得压电材料在工程中得到了广泛的应用。例如，压电材料已被用来制作智能结构，此类结构除具有自承载能力外，还具有自诊断性、自适应性和自修复性等功能，在未来的飞行器设计中占有重要的地位。

15.1.2 压电材料的主要特性

1）机电转换性能：应具有较大的压电系数。

2）机械性能：压电元件作为受力元件，希望它的机械强度高、机械刚度大，以期获得宽的线性范围和高的固有频率。

3）电性能：应具有高的电阻率和大的介电常数，以减小电荷泄漏并获得良好的低频特性。

4）温度和湿度的稳定性要好。具有较高的居里点，以得到宽的工作温度范围。

5）时间稳定性：其电压特性应不随时间而蜕变。

压电材料的主要特性参数有：

1）压电常数。

2）弹性常数。

3）介电常数。

4）机电耦合系数。

5）电阻。

6）居里点。

15.1.3 压电复合材料的有限元分析方法

传统上一般采用细观力学方法分析压电复合材料的有效性能，主要目的是建立材料的宏观有效性能，包括弹性、压电和介电性能，与细观结构的定量关系，以指导材料的设计和制造。但是对于一般的细观力学方法来说，例如，Dilute 模型、自洽方法、Mori-Tanaka 模型和微分方法等，其建立起来的力学模型中涉及了大量复杂的积分和微分公式，用普通的解析法一般无法准确地求出正确解。例如，Dunn 和 Taya 使用常用的细观力学模型自洽方法，Mori-Tanaka 模型和微分方法对压电复合材料的压电系数进行了预报，并与实验数据进行比较。结果表明：除了体积分数较小时，这些方法给出了比较接近的数值结果；但是当体积分数较大时，其数值结果就跟实验结果有很大的差别。而压电复合材料作为两种和两种以上组成的宏观非均匀材料可以用合适的具有某种周期分布的微结构材料来表示，这样针对某一周期的非均匀材料单元，利用通常的有限元及边界元方法，可以数值上求得纤维、基体及界面处的应力分布，在此基础上可以预报复合材料的有效性能。这弥补了应用常规细观力学方法无法预报纤维或高体积分数及具有复杂微分结构材料等情况的不足。

15.1.4 基本耦合公式

压电线性理论的基本耦合公式（Tiersten，1969）如下：

$$T_p = C_{pq}^E S_q - e_{pk} E_k$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \varepsilon_{ik}^S E_k$$

这个压电耦合公式也可以用矩阵表示为：

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{CS} - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{e}\boldsymbol{S} + \varepsilon \boldsymbol{E}$$

式中，T 为应力矩阵；D为电荷密度矩阵；S为应变矩阵；E为电场强度矩阵；C 为刚度

矩阵；e 为压电应力常数矩阵；ε为介电溃数矩阵。

15.1.5 压电材料的主要参数

1．自由介电常数 εT33（free permittivity）

电介质在应变为零（或常数）时的介电常数，其单位为法拉/米。

2．相对介电常数 εTr3（relative permittivity）

自由介电常数 εT33 与真空介电常数 ε0 之比值，εTr3=εT33/ε0，它是一个无因次的物理量。

3．介质损耗（dielectric loss）

电介质在电场作用下，由于电极化弛豫过程和漏导等原因在电介质内所损耗的能量。

4．损耗角正切 tanδ（tangent of loss angle）

理想电介质在正弦交变电场作用下流过的电流比电压相位超前 90°，但是在压电陶瓷试样中因有能量损耗，电流超前的相位角 ψ 小于 90°，它的余角 δ（δ+ψ=900）称为损耗角，它是一个无因次的物理量，人们通常用损耗角正切 tanδ 来表示介质损耗的大小，它表示了电介质的有功功率（损失功率）P 与无功功率 Q 之比。即电学品质因数 Qe（electrical quality factor）电学品质因数的值等于试样的损耗角正切值的倒数，用 Qe 表示，它是一个无因次的物理量。若用并联等效电路表示交变电场中的压电陶瓷的试样，则 Qe=1/ tanδ=ωCR 。

5．机械品质因数 Qm（mechanical quanlity factor）

压电振子在谐振时储存的机械能与在一个周期内损耗的机械能之比称为机械品质因数。

6．泊松比（poissons ratio）

泊松比指固体在应力作用下的横向相对收缩与纵向相对伸长之比，是一个无因次的物理量，用 δ 表示，即 δ= - S 12 /S11。

7．串联谐振频率 fs（series resonance frequency）

压电振子等效电路中串联支路的谐振频率称为串联谐振频率，用 fs 表示；并联谐振频率 fp（parallel resonance frequency）压电振子等效电路中并联支路的谐振频率称为并联谐振频率，用 f p 表示。

8．反谐振频率 fa（antiresonance frequency）

使压电振子的电纳为零的一对频率中较高的一个频率称为反谐振频率，用 fa 表示。

9．最大导纳频率 fm（maximum admittance frequency）

压电振子导纳最大时的频率称为最大导纳频率，这时振子的阻抗最小，故又称为最小阻抗频率，用 f m 表示；压电振子导纳最小时的频率称为最小导纳频率（minimum admittance frequency），这时振子的阻抗最大，故又称为最大阻抗频率，用 fn 表示。

10．基频（fundamental frequency）

给定的一种振动模式中最低的谐振频率称为基音频率，通常成为基频。

11．泛音频率（fundamental frequency）

给定的一种振动模式中基频以外的谐振频率称为泛音频率。

12．温度稳定性（temperature stability）

温度稳定性指压电陶瓷的性能随温度而变化的特性。在某一温度下，温度变化 1℃时，

某频率的数值变化与该温度下频率的数值之比，称为频率的温度系数 TKf。另外，通常还用最大相对漂移来表征某一参数的温度稳定性。

13．机电耦合系数（ELECTRO MECHANICAL COUPLING COEFFICIENT）

机电耦合系数 K 是介电相互作用能量密度平方 V122 与贮存的弹性能密度 V1 与介电能密度 V2 乘积之比的平方根。压电陶瓷常用以下 5 个基本耦合系数。

1）平面机电耦合系数 KP：反映薄圆片沿厚度方向极化和电激励，作径向伸缩振动时机电耦合效应的参数。

2）横向机电耦合系数 K31：反映细长条沿厚度方向极化和电激励，作长度伸缩振动的机电耦合效应的参数。

3）纵向机电耦合系数 K33：反映细棒沿长度方向极化和电激励，作长度伸缩振动的机电耦合效应的参数。

4）厚度伸缩机电耦合系数 KT：反映薄片沿厚度方向极化和电激励，作厚度方向伸缩振动的机电效应的参数。

5）厚度切变机电耦合系数 K15：反映矩形板沿长度方向极化，激励电场的方向垂直于极化方向，作厚度切变振动时机电耦合效应的参数。

14．压电应变常数 D（Piezoelectric Strain Constant）

压电应变常数是在应力 T 和电场分量 EM（M≠I）都为常数的条件下，电场分量 E 变化所引起的应变分量 SI 的变化与 EI 变化之比。

15．压电电压常数 G（Piezoelectric Voltage Constant）

该常数是在电位移 D 和应力分量 TN（N≠I）都为常数的条件下，应力分量 TI 的变化所引起的电场强度分量 EI 的变化与 TI 的变化之比。

16．居里温度 TC（Curie Temperature）

压电陶瓷只在某一温度范围内具有压电效应，它有一临界温度 TC，当温度高于 TC 时，压电陶瓷发生结构相转变，这个临界温度 TC 称为居里温度。

17．温度稳定性（Temperature Stability）

指压电陶瓷的性能随着温度变化的特性，一般描述温度稳定性有温度系数或最大相对漂移两种方法。

18．十倍时间老化率 Y（Ageing Rate Per Decade）

表示某一参数频率常数（Frequency Constant）对于径向和横向长度伸缩振动模式，其频率常数为串联谐振频率与决定此频率的振子尺寸（直径或长度）的乘积。对于纵向长度厚度和伸缩切变振动模式，其频率常数为并联谐振频率与决定此频率的振子尺寸（长度或厚度）的乘积，其单位为 Hz • m。

15.2 压电分析模块的安装

ANSYS Workbench 平台的压电分析除了可以通过 ANSYS APDL 进行分析外，还可以添加 Extension 模块后，将压电材料分析模块作为一个接口程序，在购买到 ANSYS 程序后，程序默认的模块中并没有集成压电分析模块，用户可以通过从 ANSYS 官方网站上下载到安装包，适用于 ANSYS Workbench 16.0 平台的安装包程序名为 ACT_Piezo_R150_v7.wbex，下

面将介绍如何安装压电分析模块。

为了方便读者或者用户对程序的系统化管理，在 ANSYS 安装目录的 V150 文件夹下建立一个新文件夹命名为 ACT，将下载到的压电材料分析包复制到文件夹中，如图 15-1 所示。

注：操作系统为 Vsita 以上版本需要使用右键以管理员身份操作。

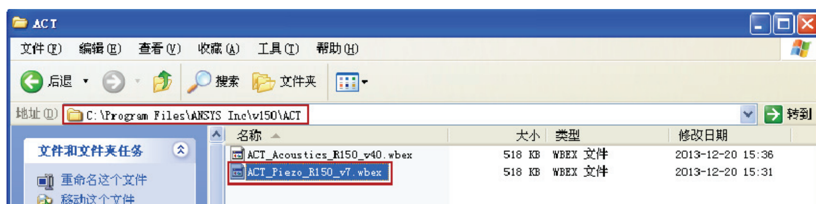


图 15-1　建立文件夹

启动 ANSYS Workbench 平台，选择菜单栏中的 Extensions→Install Extension…命令，在弹出的图 15-2 所示的“打开”对话框中选择 ACT 文件夹中的 ACT_Piezo_R150_v7.wbex 文件名，此时将显示安装成功，单击“确定”按钮即可。

注：如果已经安装，还将提示是否覆盖安装的提示信息。

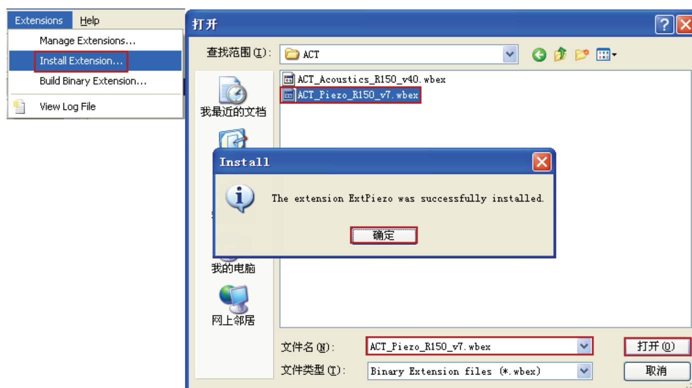


图 15-2　安装模块

依次选择菜单 Extensions→Manage Extensions…选项，在弹出的图 15-3 所示的 Extensions Manager 对话框中勾选 ExtPiezo 选项，单击 Close 按钮即可。

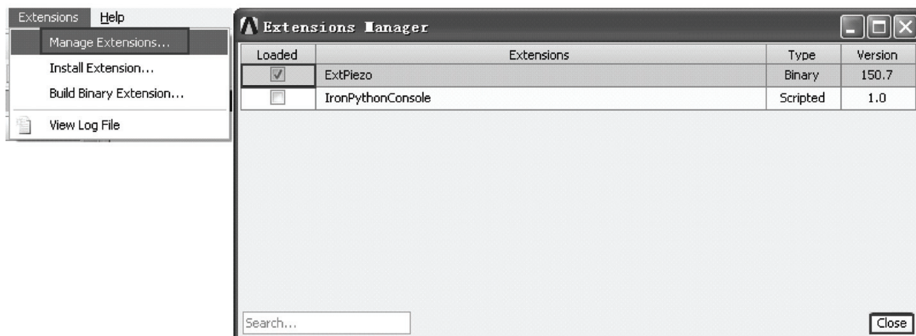


图 15-3　Extensions Manager 对话框

新建一个分析项目，在计算模块中将出现图 15-4 所示的命令行。

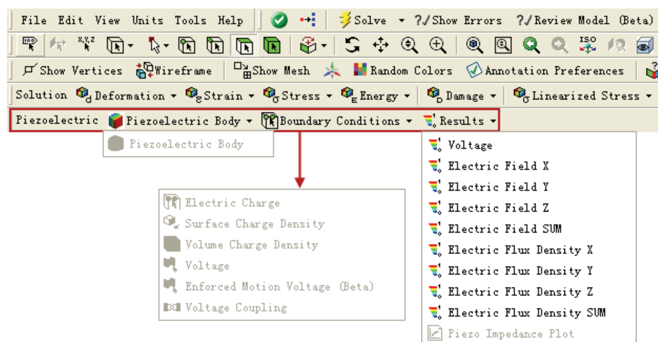


图 15-4　压电分析命令行

15.3　压电分析实例——压电传感器分析

压电传感器应用的领域比较广泛，如建筑行业、水利工程、机械行业、医疗行业及航空航天等都在使用压电传感器，而压电传感器所测试的参数主要有力、压力及加速度等。

下面通过一个简单的案例讲解 ANSYS Workbench 的有预应力存在时结构模型压电分析的一般步骤。

学习目标：熟练掌握分析的建模方法及求解过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter15\char15-1\STRUCTURE2PIEZO.wbpj

15.3.1 问题描述

图 15-5 所示的结构件上贴附有一个压电传感器，通过对结构件的一端施加压力，产生的形变导致压电传感器的形变，在压电传感器的上面将产生电压分布，这个电压分布可以预测结构件的形变大小。

注：本算例仅仅讲解如何做压电材料的分析，里面设置的参数不适合工程使用。

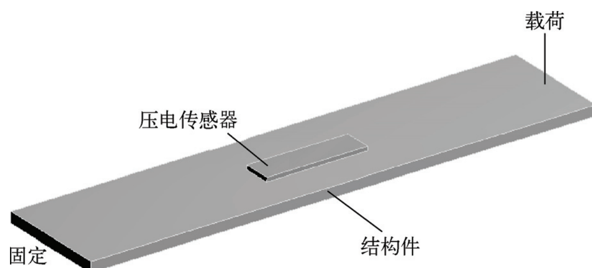


图 15-5　几何模型

15.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静力分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 15-6 所示。

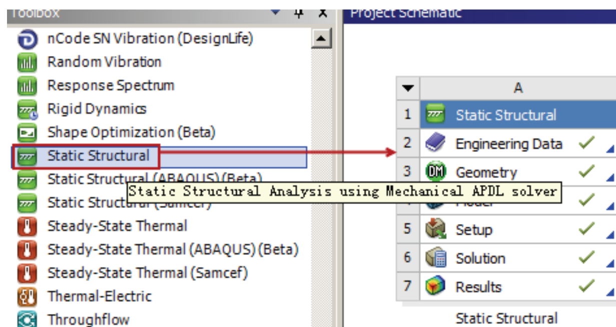


图 15-6　创建分析项目 A

15.3.3 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 15-7 所示。

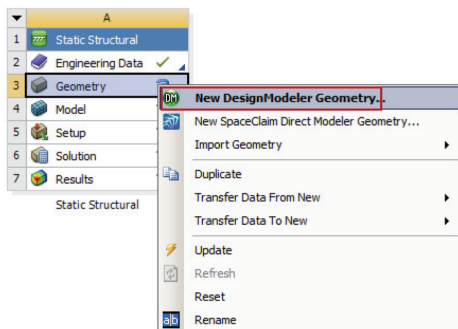


图 15-7　导入几何体

Step2：此时将进入 DM 几何建模平台。

Step3：在 Outline Tree 窗口下面单击 XY Plan，选择 Sketching 选项卡进行图 15-8 所示的操作。

选择 Draw→Rectangle 命令，在绘图窗口中绘制矩形。

选择 Constraints→Symmetry 命令，在绘图区中先选中对称轴，再分别选中两边线，此时两边线根据对称轴对称约束。

同样操作完成另外两个线的对称操作。

选择 Dimensions→General 命令，分别对高度和宽度进行标注，如图 15-9 所示。



Step4： 在 Details of View 设置窗口中输入：H1=0.1m，V2=0.01m。

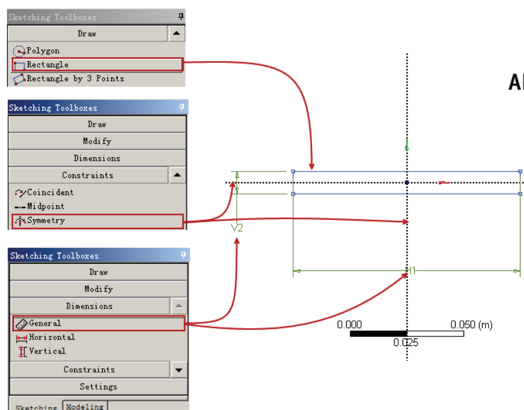


图 15-8　创建几何体

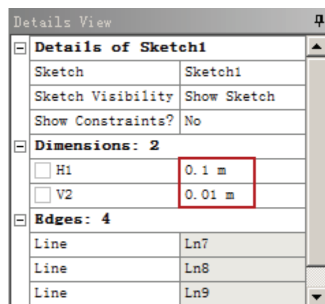


图 15-9　输入参数

Step5： 切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude 命令，在图 15-10 所示的 Details View 面板中进行如下设置。

在 Geometry 栏中确保草绘的几何被选中，此时 Geometry 栏中显示 Sketch1 字样。

在 Extent Type→FD1,Depth 栏中输入 0.5m。

Step6： 单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 15-11 所示。

Step7： 选中几何实体，依次单击菜单栏中的 Tools→Freeze 命令，将几何实体冻结。

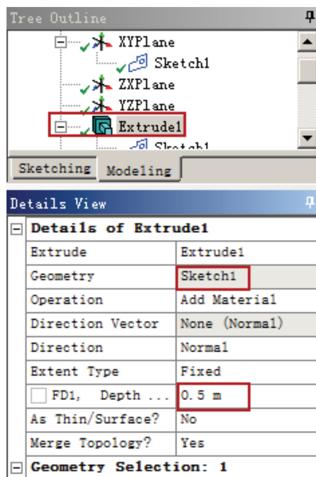


图 15-10　Details View 面板

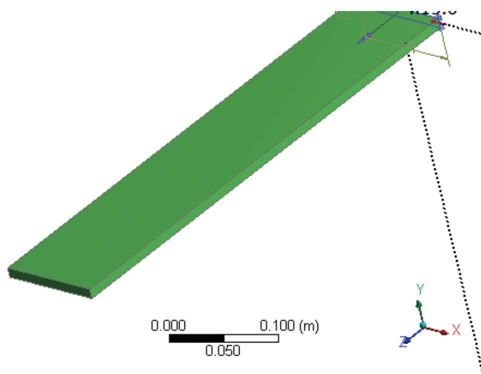


图 15-11　生成几何体

Step8： 选择几何实体的上面（Y 坐标最大位置的面），选择 Sketching 选项卡进行图 15-12 所示的操作。

单击 Draw→Rectangle 命令，在绘图窗口中绘制矩形。

单击 Dimensions→General 命令，分别对高度和宽度进行标注，如图 15-12 所示。

在 Details of View 设置窗口中输入：H1=0.1m，V2=0.025m，H4=0.2m。

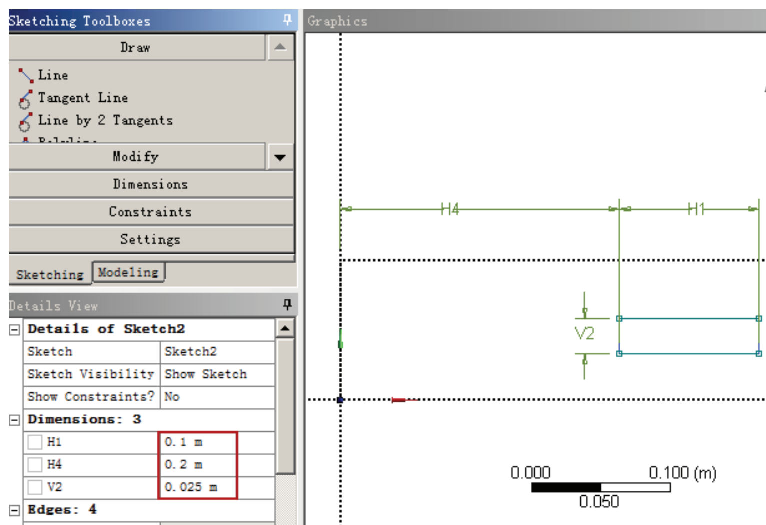


图 15-12　创建几何体

Step9：切换到 Modeling 选项卡，单击工具栏中的 Extrude 命令，在图 15-13 所示的 Details View 面板中进行如下设置。

在 Geometry 栏中确保草绘的几何被选中，此时 Geometry 栏中显示 Sketch2 字样。

在 Extent Type→FD1,Depth 栏中输入 0.04m。

Step10：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 15-14 所示。

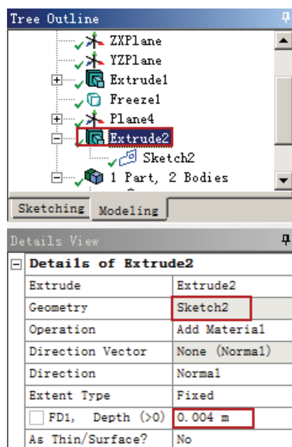


图 15-13　Details View 面板

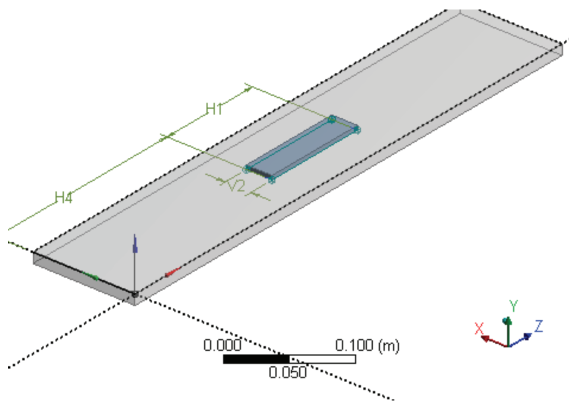


图 15-14　生成几何体

Step11：右键选中新建立的几何实体，在弹出的快捷菜单中选择 Rename 选项，将几何命名为 PIEZO。

Step12：同样将另一个几何命名为 PLATE。

Step13：右键选中两个几何实体，在弹出的快捷菜单中选择 From new Part 命令。

Step14：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

15.3.4 添加材料库

由于压电分析中不需要设置材料属性，故这步骤默认即可。

15.3.5 网格与属性

Step1：双击项目 A 中的 A4 进入图 15-15 所示的 Mechanical 平台，在平台的工具栏中将显示压电材料的设置分析后处理命令。

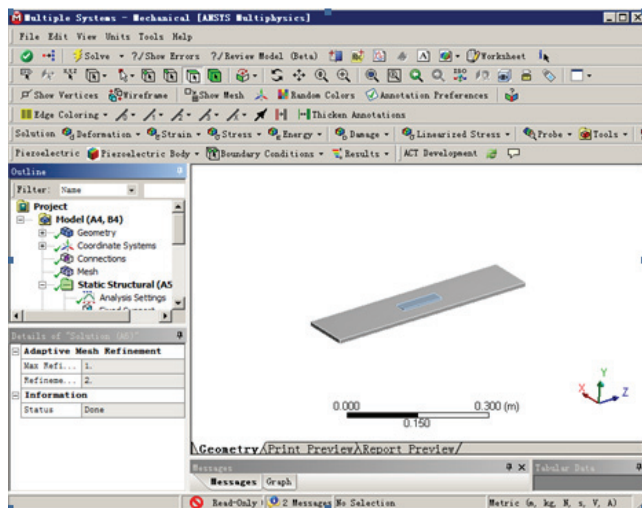


图 15-15 分析平台

Step2：在 Outlines（分析树）中单击 Mesh 选项，在下面出现的图 15-16 所示的 Details of “Mesh” 窗口中的 Element Size 栏中输入尺寸为 5.e-003m。单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 15-17 所示。

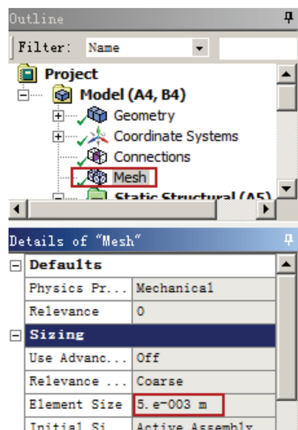


图 15-16 生成网格

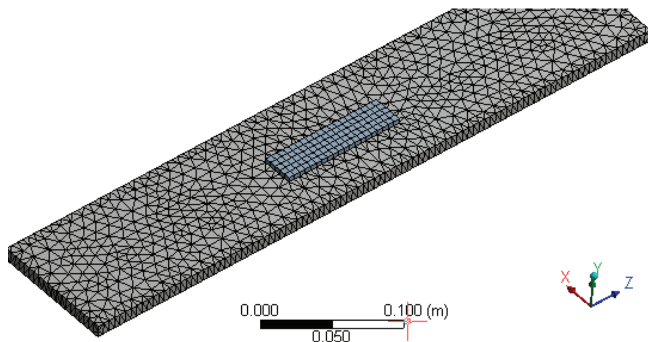


图 15-17 网格效果

Step3：单击 Static Structural（A6）选项，在工具栏中显示的 Piezoelectric（压电选项）

中选择 Piezoelectric Body→Piezoelectric Body 选项，如图 15-18 所示。

Step4：单击 Static Structural（A6）→Piezoelectric Body 选项，出现的 Details of “Piezoelectric Body”面板中进行如下设置。

在 Geometry 栏中确保图中两个几何全部选中，并单击 Apply 按钮。

在 Definition→PIEZ e31 中输入 0.39，单位默认即可。

在 Definition→PIEZ e33 中输入 0.75，单位默认即可。

在 Definition→PIEZ e15 中输入 0.675，单位默认即可。

在 Definition→DPER ep11 中输入 3130，单位默认即可。

在 Definition→DPER ep33 中输入 3400，单位默认即可，如图 15-19 所示。

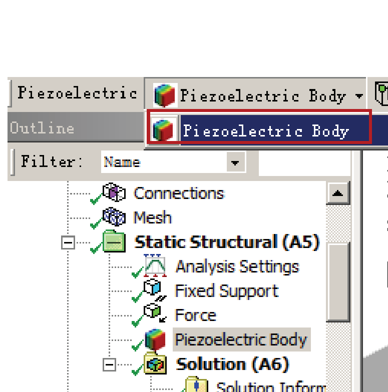


图 15-18　压电属性

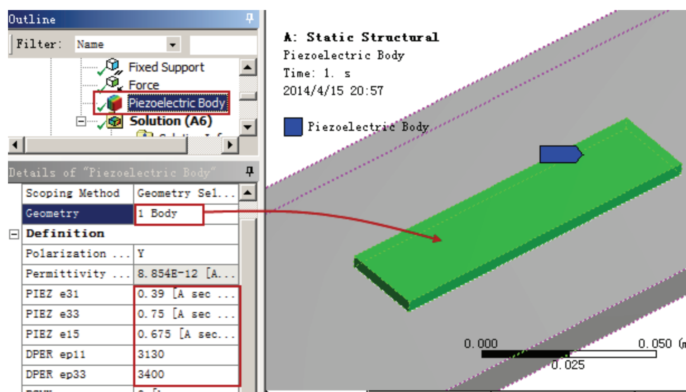


图 15-19　输入压电参数

15.3.6 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Static Structural（A6）选项，此时会出现图 15-20 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 15-21 所示。

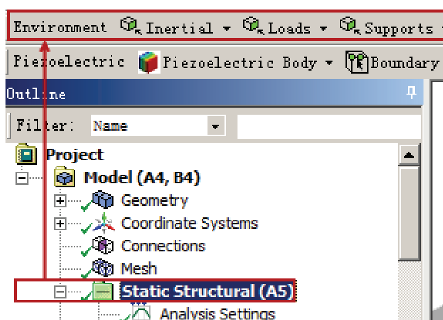


图 15-20　Environment 工具栏

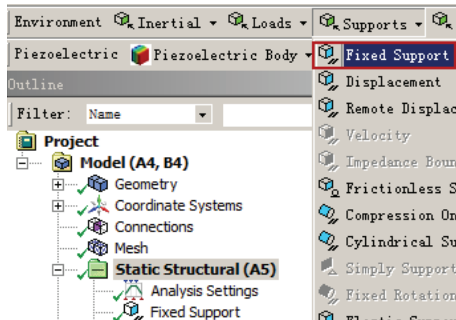


图 15-21　添加固定约束

Step3：选中 Fixed Support，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Static

Structural（A5）”（参数列表）→Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 15-22 所示。

Step4： 如同 Step2，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，在图 15-23 所示的窗口中进行如下操作。

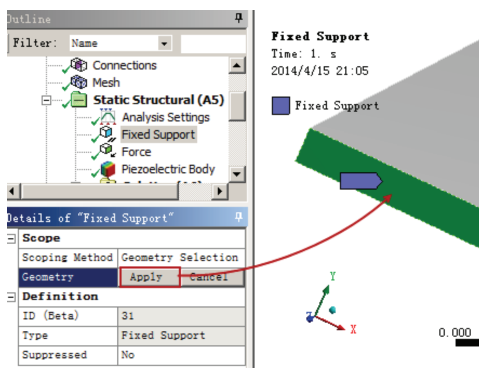


图 15-22 施加固定约束

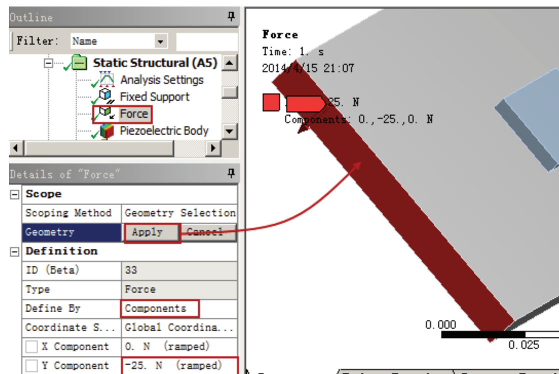


图 15-23 添加压力

在 Geometry 栏中选择另一端面，并单击 Apply 按钮。

在 Define By 栏中选择 Components 选项。

在 Y Component 栏中输入-25N。

Step5： 在 Outlines（分析树）中的 Static Structural（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

15.3.7 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（A6）选项，此时会出现图 15-24 所示的 Piezoelectric 工具栏。

Step2： 选择 Piezoelectric 工具栏中的 Results（结果）→Voltage 命令，此时在分析树中会出现 Voltage（电压分布）选项，如图 15-25 所示。

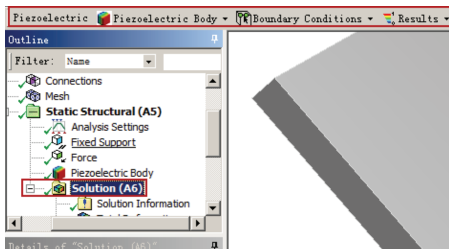


图 15-24 Piezoelectric 工具栏

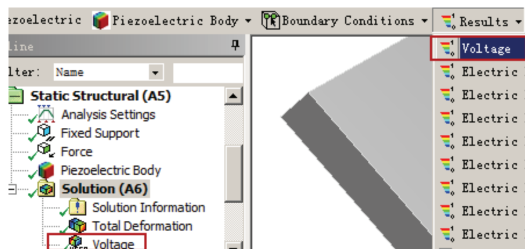


图 15-25 电压分布选项

Step3： 在 Outlines（分析树）→Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 15-26 所示。

Step4： 选择 Outline（分析树）→Solution（B6）→Voltage 选项，此时会出现图 15-27 所示的电压分析云图。

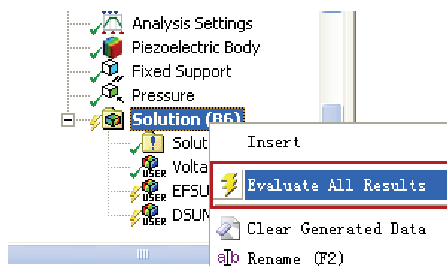


图 15-26 快捷菜单

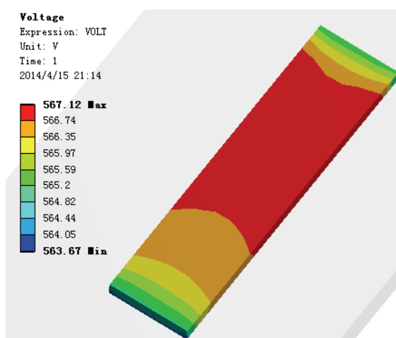


图 15-27 电压分析云图

Step5：添加 Equivalent Stress 和 Deformation 选项，此时会出现图 15-28 所示的应力和变形分析云图。

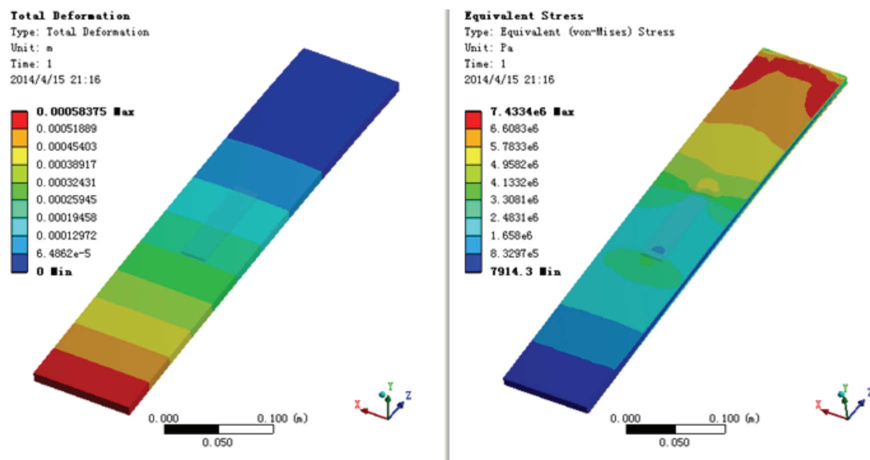


图 15-28 应力和变形云图

15.3.8 模态分析

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：创建图 15-29 所示的模态分析选项。

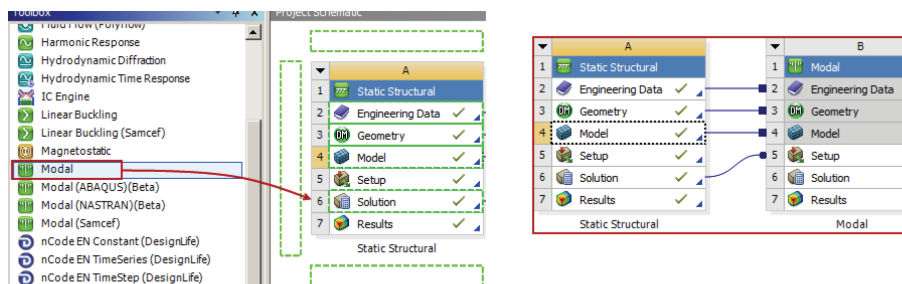


图 15-29 模态分析

Step3：双击项目 B 中的 B5（Setup）栏，进入 Mechanical 平台进行模态分析。

Step4：保持设置为默认，进行模态有限元计算。

Step5：添加 Voltage 选项，并将模态值设置为 1，此时出现图 15-30 所示的电压分布云图。

Step6：添加 Deformation 选项，此时出现图 15-31 所示的变形云图。

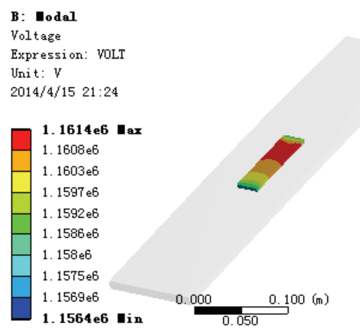


图 15-30　1 阶电压分布云图

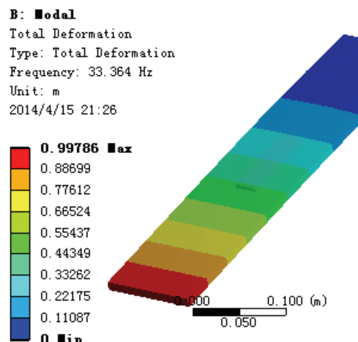


图 15-31　1 阶变形云图

Step7：取模态值为 2 时的电压分布和变形如图 15-32 和图 15-33 所示。

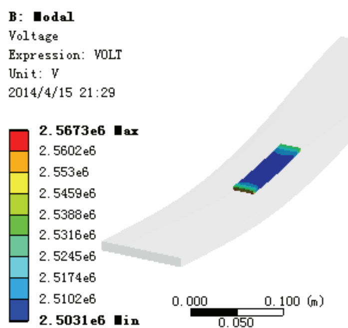


图 15-32　2 阶电压分布云图

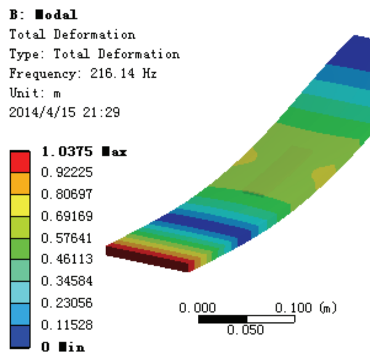


图 15-33　2 阶变形云图

Step8：取模态值为 3 时的电压分布和变形如图 15-34 和图 15-35 所示。

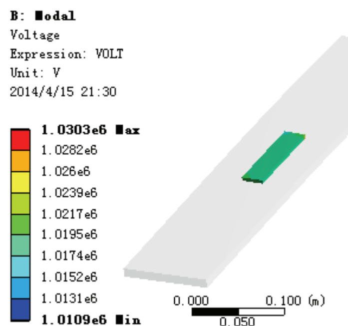


图 15-34　3 阶电压分布云图

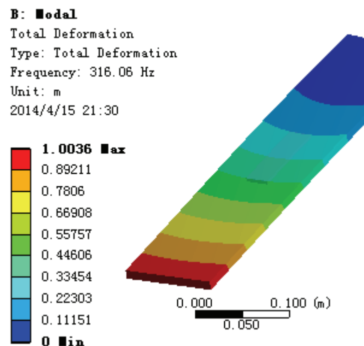


图 15-35　3 阶变形云图

Step9： 取模态值为 4 时的电压分布和变形如图 15-36 和图 15-37 所示。

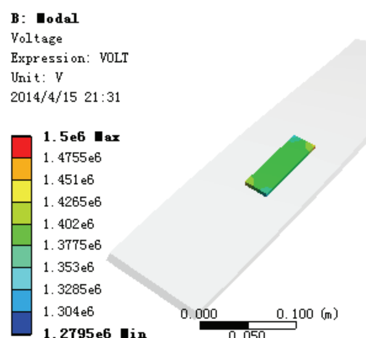


图 15-36　4 阶电压分布云图

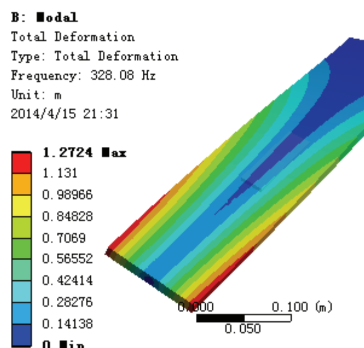


图 15-37　4 阶变形云图

Step10： 取模态值为 5 时的电压分布和变形如图 15-38 和图 15-39 所示。

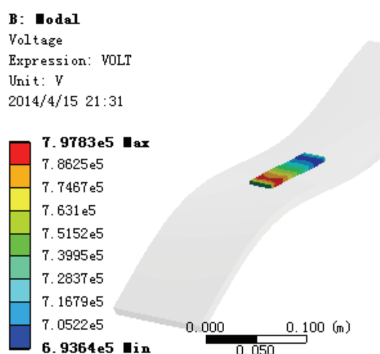


图 15-38　5 阶电压分布云图

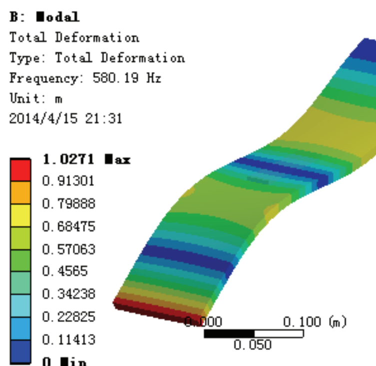


图 15-39　5 阶变形云图

Step11： 取模态值为 6 时的电压分布和变形如图 15-40 和图 15-41 所示。

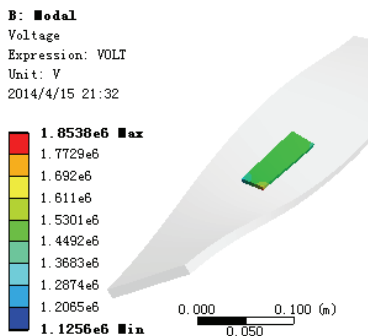


图 15-40　6 阶电压分布云图

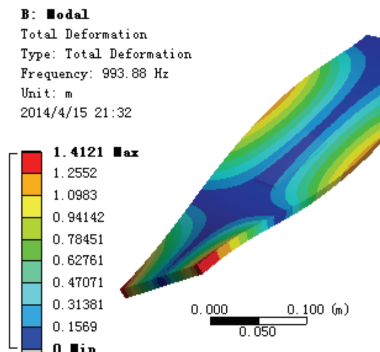


图 15-41　6 阶变形云图

15.3.9 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，在文件名中输入 STRUCTURE2PIEZO 保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

15.4 小结

本章通过一个简单的案例，介绍了压电传感器的建模和分析方法，由于篇幅限制，本章并未对压电材料理论进行过多的讲解，如果想深入学习，请读者参考相关的书籍进行学习。

第 4 篇

第 16 章 热 学 分 析

热学是物理场中的一种常见现象，在工程分析中热学包括热传导、热对流和热辐射 3 种基本形式，计算热力学在工程应用中至关重要，如在高温作用下的压力容器，如果温度过高会导致内部气体膨胀导致压力容器爆裂。本章主要介绍 ANSYS Workbench 热学分析，讲解稳态热学计算过程。

知识点 \ 学习目标	了 解	理 解	应 用	实 践
热学的基本概念		√		
热学三种形式		√		√
稳态热分析设置			√	√
稳态热分析边界条件			√	√
稳态热分析后处理			√	√

16.1 热力学分析简介

在石油化工、动力、核能等许多重要部门中，在变温条件下工作的结构和部件，通常都存在温度应力问题。在正常工况下存在稳态的温度应力，在启动或关闭过程中还会产生随时间变化的瞬态温度应力。这些应力已经占有相当的比重，甚至成为设计和运行中的控制应力。要计算稳态或者瞬态应力，首先要计算稳态或者瞬态温度场。

16.1.1 热力学分析目的

热力学分析的目的就是计算模型内的温度分布以及热梯度、热流密度等物理量。热载荷包括热源、热对流、热辐射、热流量和外部温度场等。

16.1.2 热力学分析

ANSYS Workbench 可以进行两种热分析，即稳态热分析和瞬态热分析。

稳态热力学分析一般方程为

$$\boldsymbol{KI} = \boldsymbol{Q} \tag{16-1}$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 是传导矩阵，包括热系数、对流系数及辐射系数和形状系数；$\boldsymbol{I}$ 是节点温度向量；$\boldsymbol{Q}$ 是节点热流向量，包含热生成。

16.1.3 基本传热方式

基本传热方式有：热传导、热对流及热辐射。

1．热传导

当物体内部存在温差时，热量从高温部分传递到低温部分；不同温度的物体相接触时，热量从高温物体传递到低温物体。这种热量传递的方式叫热传导。

热传导遵循傅里叶定律：

$$q'' = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{16-2}$$

式中，q'' 是热流密度，其单位为 $\mathrm{W/m^2}$；k 是导热系数，其单位为 W/(m℃)。

2．热对流

对流是指温度不同的各个部分流体之间发生相对运动所引起的热量传递方式。高温物体表面附近的空气因受热而膨胀，密度降低而向上流动，密度较大的冷空气将下降替代原来的受热空气而引发对流现象。热对流分为自然对流和强迫对流两种。

热对流满足牛顿冷却方程：

$$q'' = h(T_s - T_b) \tag{16-3}$$

式中，h 是对流换热系数（或称膜系数）；T_s 是固体表面温度；T_b 是周围流体温度。

3．热辐射

热辐射是指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。与热传导和热对流不同，热辐射不需要任何传热介质。

实际上，真空的热辐射效率最高。同一物体，温度不同时的热辐射能力不一样，温度相同的不同物体的热辐射能力也不一样。同一温度下，黑色物体的热辐射能力最强。

在工程中通常考虑两个或者多个物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可用斯蒂芬波尔兹曼方程来计算：

$$q = \varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4) \tag{16-4}$$

式中，q 为热流率；ε 为辐射率（黑度）；σ 为黑体辐射常数 $\sigma \approx 5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$；$A_1$ 为辐射面 1 的面积；F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；T_1 为辐射面 1 的绝对温度；T_2 为辐射面 2 的绝对温度。

从热辐射的方程可以得知，如果分析包含热辐射，则分析为高度非线性。

16.2 稳态热学分析实例 1——热传递分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的稳态热分析模块，计算实体模型的稳态温度分布及热流密度。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 建模方法及稳态热学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Chapter16\char16-1\model.agdb
结果文件	网盘\ Chapter16\char16-1\Conductor.wbpj

16.2.1 问题描述

如图 16-1 所示的实体模型，实体一端面是 500℃，另一端面是 22℃，请用 ANSYS Workbench 分析计算内部的温度场云图。

16.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 16-2 所示。

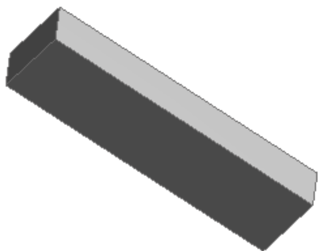


图 16-1　圆柱模型

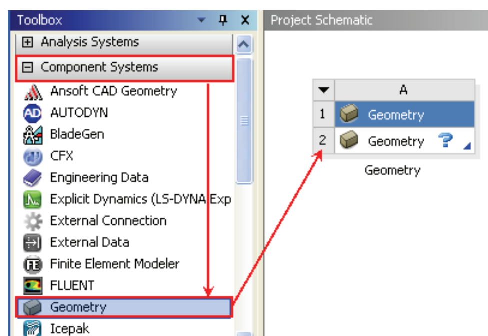


图 16-2　创建分析项目 A

16.2.3 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 16-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 model.agdb 几何体文件，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，此时会进入到 DesignModeler 界面，如图 16-4 所示。

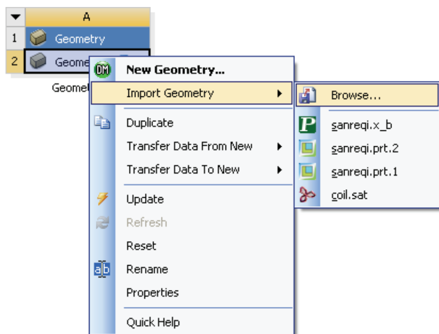


图 16-3　导入几何体

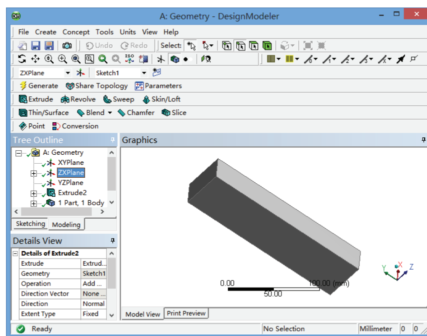


图 16-4　生成后的 DesignModeler 界面

Step4：单击工具栏中的图标，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入

Conductor.wbpj，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的 ☒（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

16.2.4 创建分析项目

Step1：如图 16-5 所示，Workbench 主界面单击 Toolbox（工具箱）→Analysis Systems→Steady-State Thermal（稳态热分析），并直接拖拽到项目 A 的 A2（Geometry）栏中。

Step2：此时会出现图 16-6 所示的项目 B，同时在项目 A 的 A2（Geometry）与项目 B 的 B2（Geometry）之间出现一条蓝色的连接线，此时说明数据在项目 A 与项目 B 之间实现共享。

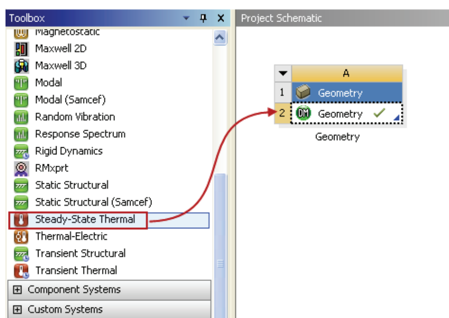


图 16-5　创建项目

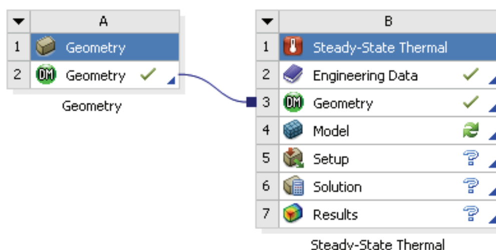


图 16-6　项目数据共享

16.2.5 添加材料库

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 项，进入图 16-7 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

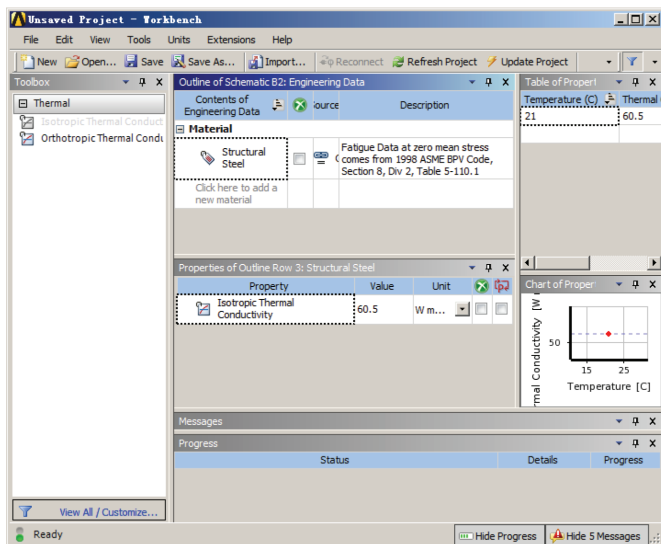


图 16-7　材料参数设置界面 1

Step2：在图 16-8 所示的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 表中的 A4 栏中输入新材料名称 New Material，此时新材料名称前会出现一个 ?，表示需要在新材料中添加属性。

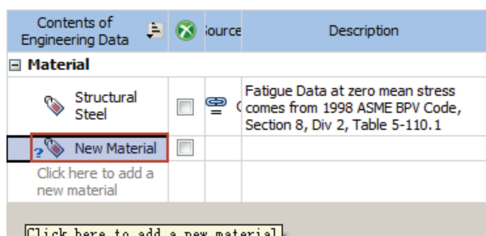


图 16-8　材料参数设置界面 2

Step3：在图 16-9 所示的 Toolbox 中选择 Thermal→Isotropic Thermal Conductivity 命令，直接拖拽到 Properties of Outline Row 4:New Material 表中的 Property 栏中，此时 Isotropic Thermal Conductivity 选项被添加到了 New Material 属性中。

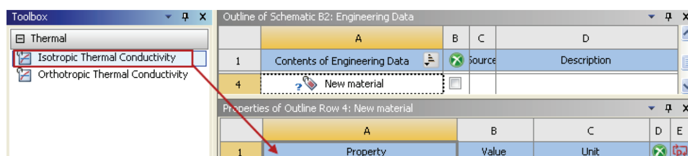


图 16-9　添加材料属性

Step4：在 Isotropic Thermal Conductivity 栏的 B2 中输入 650，单位采用默认即可，如图 16-10 所示，材料属性添加成功。

Properties of Outline Row 4: New material

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Isotropic Thermal Conductivity	650	W m^-1 C^-1		

图 16-10　设置参数

Step5：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

16.2.6　添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏 Model 项，进入图 16-11 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

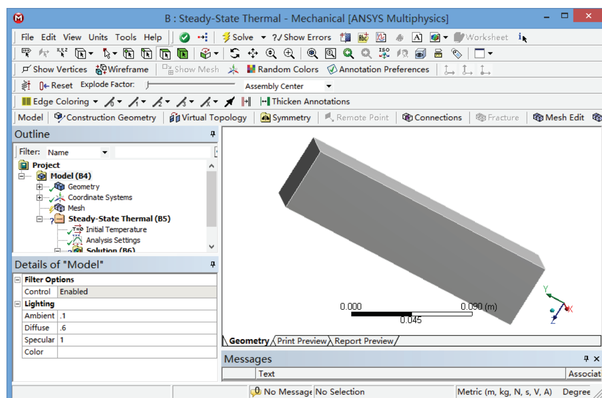


图 16-11　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→Solid 选项，此时即可在 Details of“Solid”（参数列表）中给模型添加材料，如图 16-12 所示。

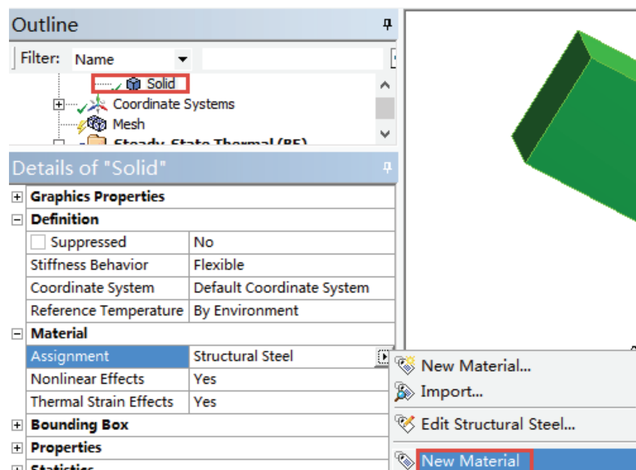


图 16-12 修改材料属性

Step3：单击参数列表中 Material 下 Assignment 黄色区域后的▸，此时会出现刚刚设置的材料 New Material，选择即可将其添加到模型中去。其余模型采用默认的即可。

16.2.7 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of“Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 16-13 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，其余采用默认设置。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，最终的网格效果如图 16-14 所示。

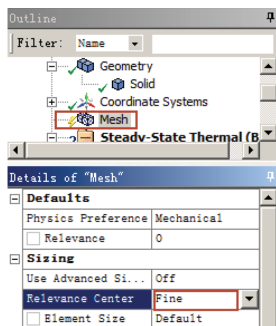


图 16-13 修改网格参数

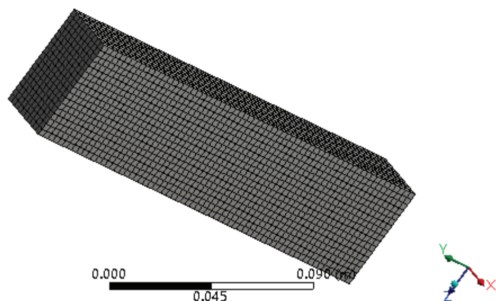


图 16-14 网格效果

16.2.8 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项，此时会出现图 16-15 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 16-16 所示。

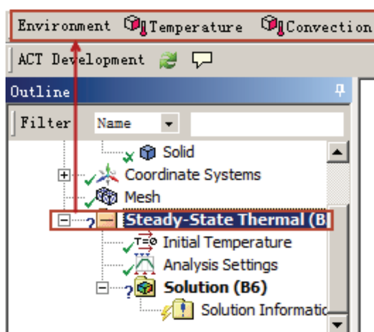


图 16-15　Environment 工具栏

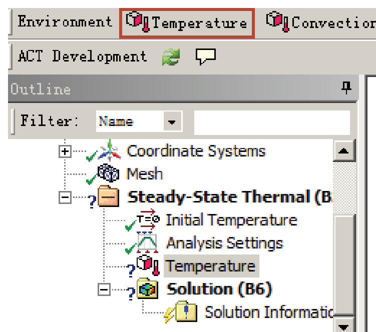


图 16-16　添加载荷

Step3：如图 16-17 所示，选中 Temperature 选项，选择实体底面，单击 Details of "Temperature" 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Definition→Magnitude 中输入 500℃，完成一个热载荷的添加。

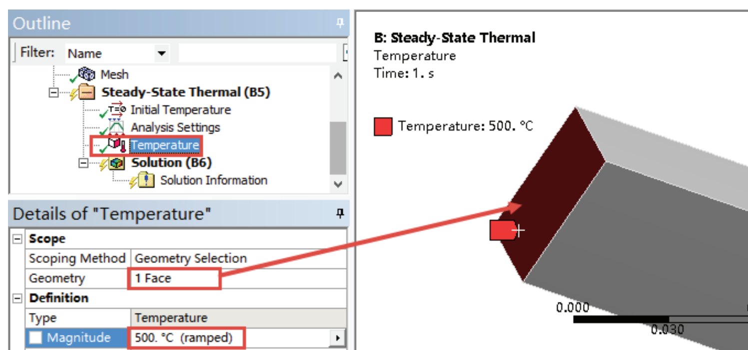


图 16-17　施加载荷

Step4：如图 16-18 所示，选中 Temperature 选项，选择实体底面，单击 Details of "Temperature" 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Definition→Magnitude 中输入 22℃，完成一个热载荷的添加。

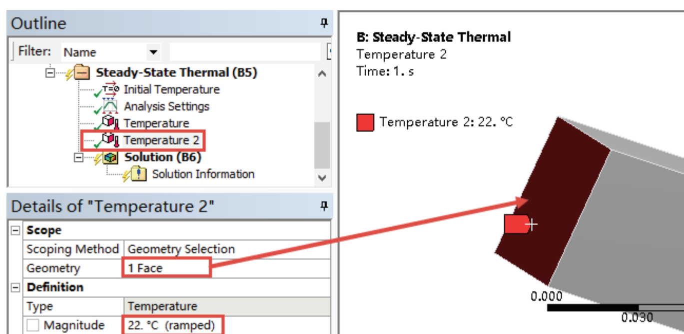


图 16-18　添加温度载荷

Step5： 在 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，如图 16-19 所示。

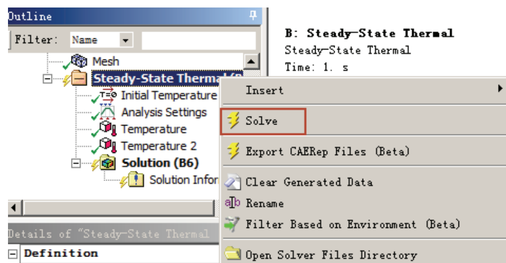


图 16-19　求解

16.2.9 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现图 16-20 所示的 Solution 工具栏。

Step2： 选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 16-21 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

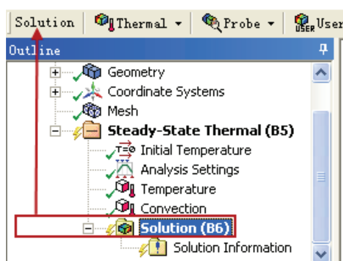


图 16-20　Solution 工具栏

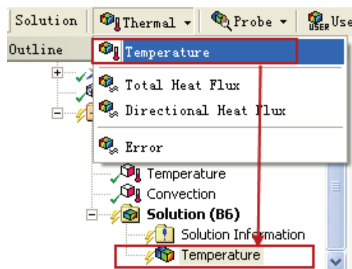


图 16-21　添加温度选项

Step3： 在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择⚡Equivalent All Results 命令，如图 16-22 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4： 选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形），如图 16-23 所示。

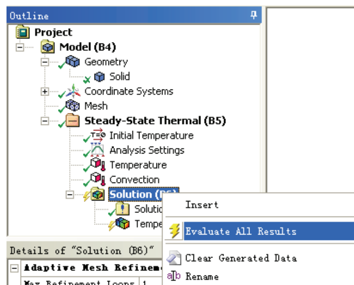


图 16-22　快捷菜单

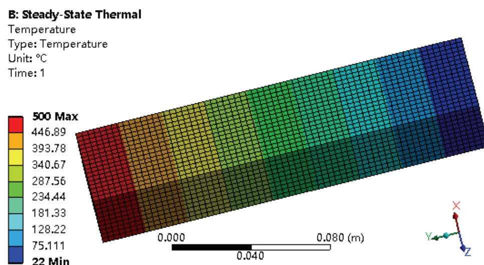


图 16-23　温度分布

Step5：同样的操作方法，查看热流量，如图 16-24 所示。

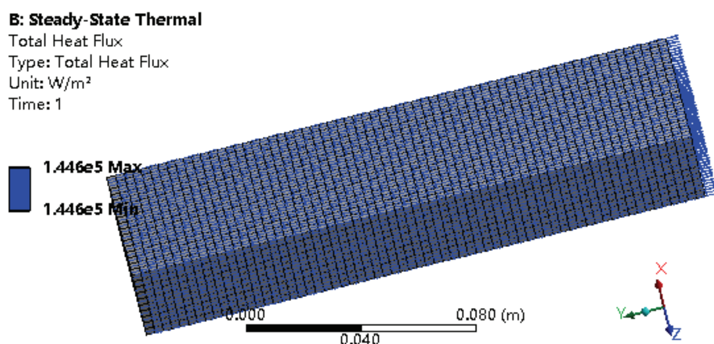


图 16-24 热流量云图

Step6：在绘图区域中单击 Y 轴，使图形 Y 轴垂直于绘图平面，如图 16-25 所示。

Step7：单击工具栏中的图标，然后在绘图区域中从右侧向左侧画一条直线，如图 16-26 中箭头方向所示。

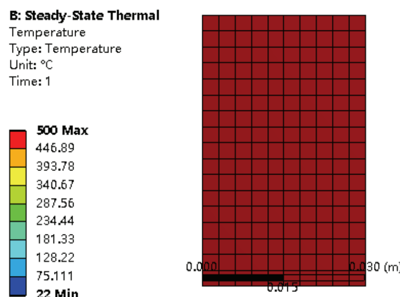


图 16-25 选中视

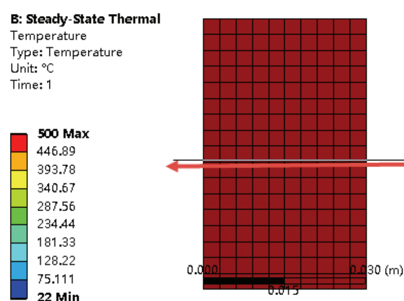
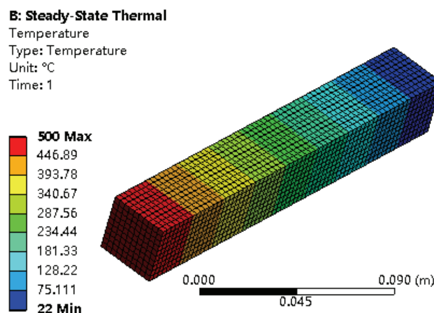


图 16-26 创建剖面线

Step8：旋转视图，图 16-27 所示为温度场在模型体内部的分布情况。



16-27 实体内部温度场分布

16.2.10 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到

Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

16.3 稳态热学分析实例 2——热对流分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的稳态热分析模块，计算实体模型的稳态温度分布及热流密度。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 建模方法及稳态热学分析的方法及过程。

模型文件	网盘\ Chapter16\char16-2\ sanrepian.x_t
结果文件	网盘\ Chapter16\char16-2\sanrepian_Thermal.wbpj

16.3.1 问题描述

如图 16-28 所示的铝制散热片模型，请用 ANSYS Workbench 确定温度沿着散热片的分布。

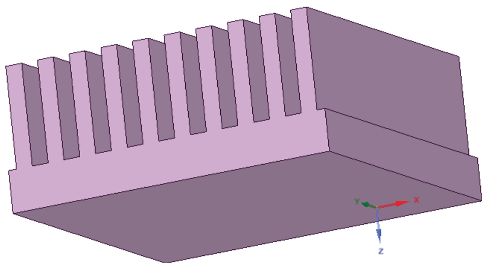


图 16-28　铝制散热片实体模型

16.3.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 16-29 所示。

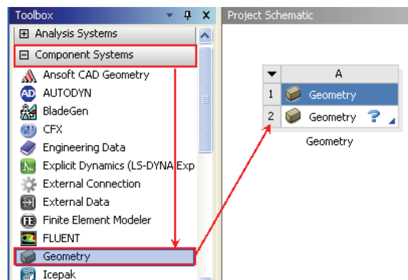


图 16-29　创建分析项目 A

16.3.3 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 16-30 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 sanrepian.x_t 几何体文件，此时

A2Geometry 后的 变为 ，表示实体模型已经存在。

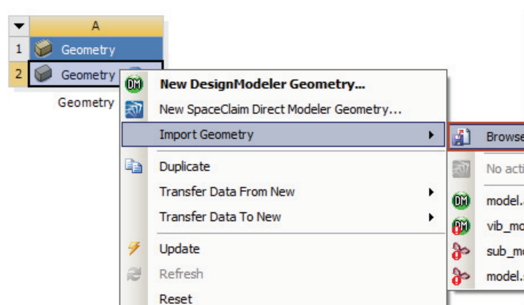


图 16-30　导入几何体

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry，设置单位为 m，单击 OK 按钮，在工具栏中单击 Generate 按钮，此时会进入到 DesignModeler 界面，如图 16-31 所示。

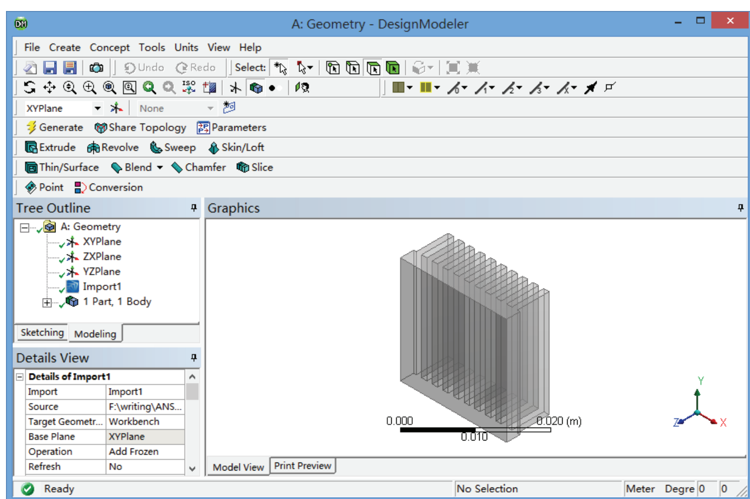


图 16-31　生成后的 DesignModeler 界面

Step4：单击工具栏中的 图标，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 sanrepian_Thermal，并单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的 （关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

16.3.4 创建分析项目

Step1：如图 16-32 所示，在 Workbench 主界面的 Toolbox（工具箱）→Analysis Systerms 中单击 Steady-State Thermal（稳态热分析），并直接拖拽到项目 A 的 A2（Geometry）栏中。

Step2：此时会出现图 16-33 所示的项目 B，同时在项目 A 的 A2（Geometry）与项目 B 的 B2（Geometry）之间出现一条蓝色的连接线，此时说明数据在项目 A 与项目 B 之间实现共享。

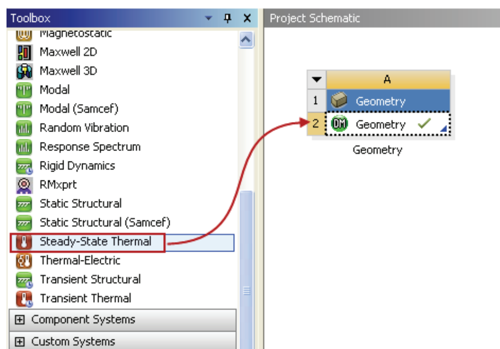


图 16-32 创建项目

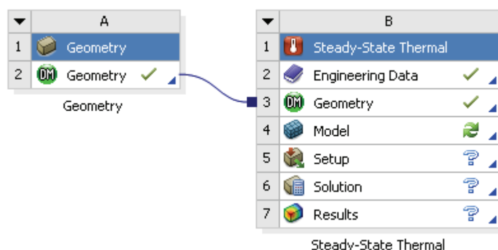


图 16-33 项目数据共享

16.3.5 添加材料库

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 项，进入图 16-34 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

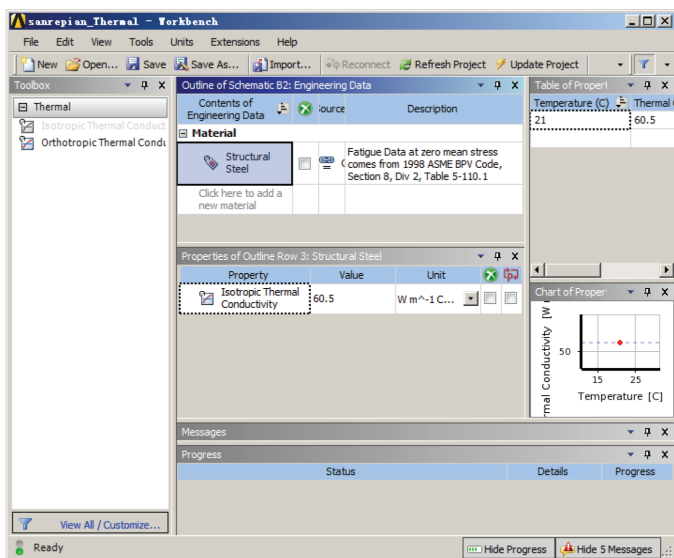


图 16-34 材料参数设置界面 1

Step2：在图 16-35 所示的 Outline of Schematic B2:Engineering Data 表中的 A4 栏中输入新材料名称 sanrepian_Material，此时新材料名称前会出现一个 **?**，表示需要在新材料中添加属性。

Step3：在图 16-36 所示的 Toolbox 中选择 Thermal→Isotropic Thermal Conductivity 命令，直接拖拽到 Properties of Outline Row 4:New Material 表中的 Property 栏中，此时Isotropic Thermal Conductivity 选项被添加到了 New Material 属性中。

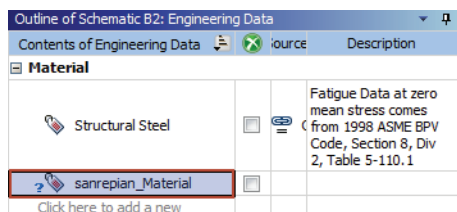


图 16-35 材料参数设置界面 2

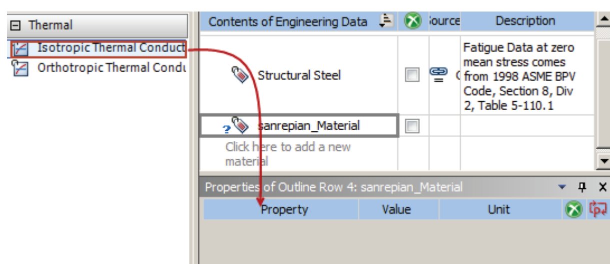


图 16-36　添加材料属性

Step4：在 Isotropic Thermal Conductivity 栏的 B2 中输入 170，单位采用默认即可，如图 16-37 所示，材料属性添加成功。

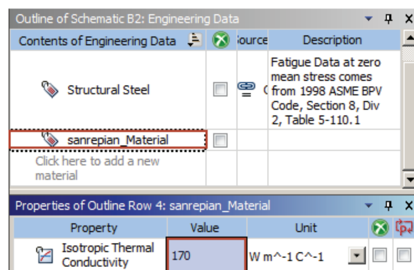


图 16-37　设置参数

Step5：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

16.3.6 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B3 栏 Model 项，进入图 16-38 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）→Geometry→Solid 选项，此时即可在 Details of "Solid"（参数列表）中给模型添加材料，如图 16-39 所示。

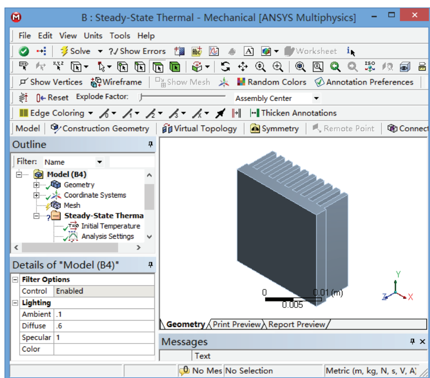


图 16-38　Mechanical 界面

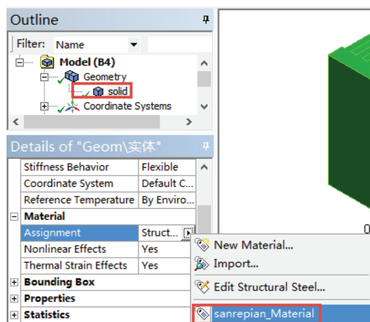


图 16-39　修改材料属性

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 黄色区域后的 ▸，此时会出现刚刚设

置的材料 sanrepian_Material，选择即可将其添加到模型中去。

16.3.7 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 16-40 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，其余采用默认设置。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分完成的网格效果如图 16-41 所示。

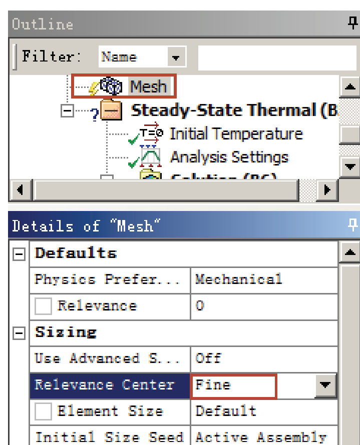


图 16-40　生成网格

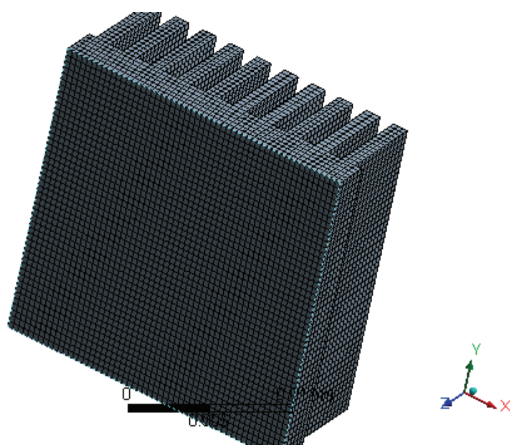


图 16-41　网格效果

16.3.8 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项，此时会出现图 16-42 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Heat Flow（热流）命令，此时在分析树中会出现 Heat Flow 选项，如图 16-43 所示。

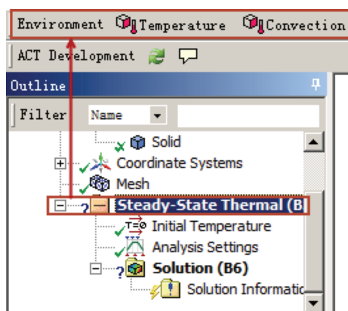


图 16-42　Environment 工具栏

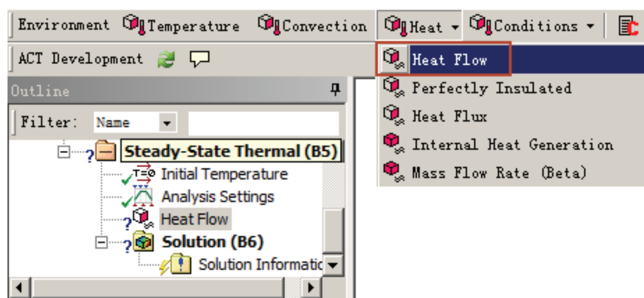


图 16-43　添加载荷

Step3：如图 16-44 所示，选中 Heat Flow，选择圆柱底面，单击 Details of "Heat Flow"中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Definition→Magnitude 中输入 40W，完成一个热载

荷的添加。

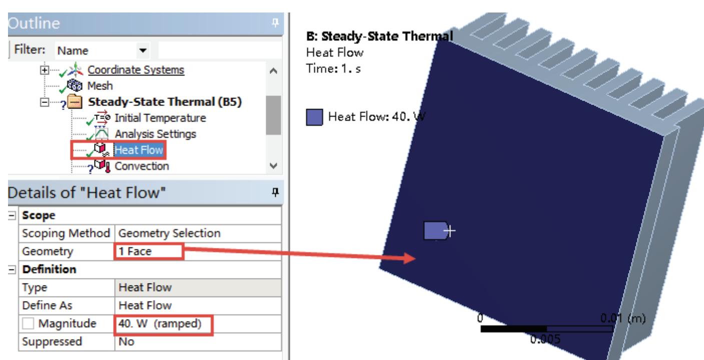


图 16-44 施加载荷

Step4： 选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 16-45 所示。

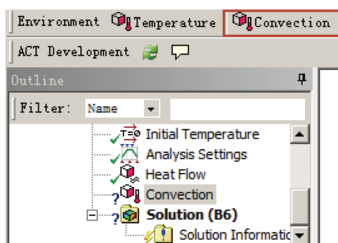


图 16-45 添加对流

Step5： 如图 16-46 所示，选中 Convection，选择模型顶面，单击 Details of "Convection" 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Definition→File Coefficient 栏中输入 40，在 Ambient Temperature 栏中输入环境温度为 20℃，完成一个对流的添加。

注：此处的面为除了热源面以外的所有面。

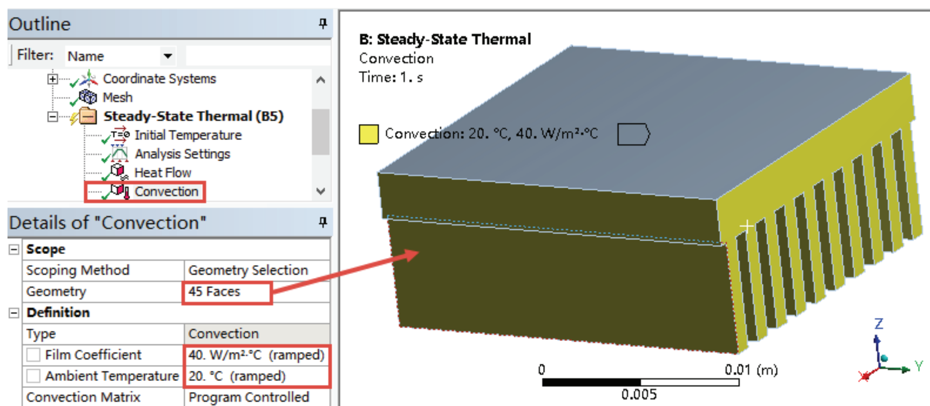


图 16-46 对流面

Step6： 在 Outlines（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

16.3.9 结果后处理

Step1： 选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）→Solution（B6）选项，此时会出现图 16-47 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 16-48 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

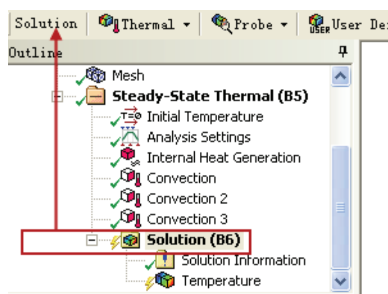


图 16-47　Solution 工具栏

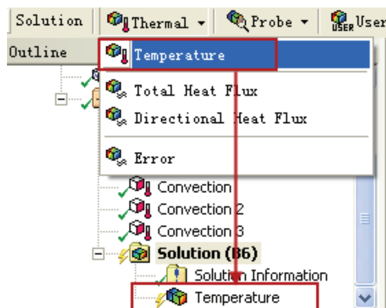


图 16-48　添加温度选项

Step3：在 Outlines（分析树）中的 Solution（B6）选项单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent All Results 命令，如图 16-49 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）→Solution（B6）→Temperature（温度）选项，如图 16-50 所示。

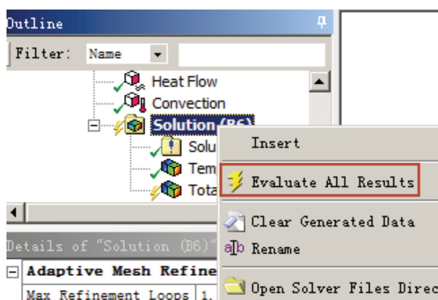


图 16-49　快捷菜单

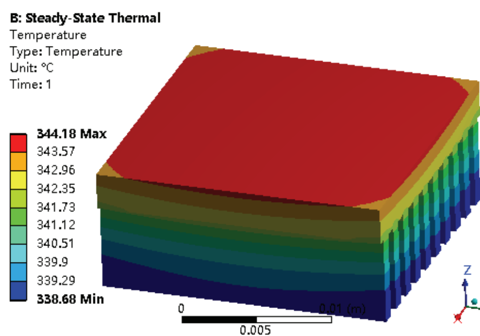
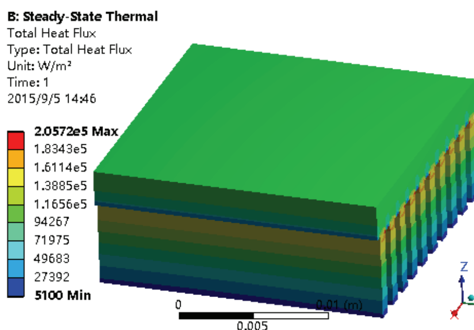


图 16-50　温度分布

Step5：同样的操作方法，查看热流量，如图 16-51 所示。



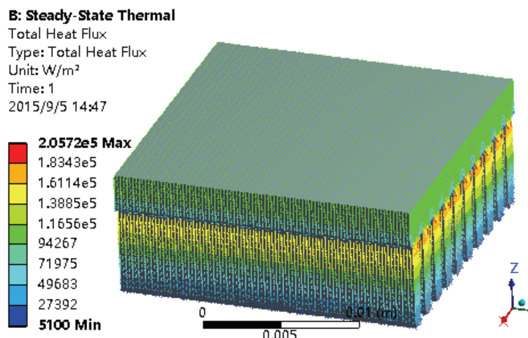


图 16-51　热流量云图及矢量图

16.3.10 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

16.3.11 读者演练

参考前面章节所讲之操作方法，请读者完成热流密度的后处理云图操作，并通过使用 Probe 命令查看关键节点上的温度值。

16.4 稳态热学分析实例 3——热辐射分析

本案例使用 ANSYS Workbench 热分析模块功能进行演示，来学习 Workbench 平台中进行热辐射分析的一般步骤。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 热辐射分析的一般步骤。掌握 ANSYS Workbench 的 APDL 命令插入的方法

模型文件	网盘\ Chapter16\char16–3\Geom.x_t
结果文件	网盘\ Chapter16\char16–3\radia.wbpj

16.4.1 案例介绍

上面摆放有加热丝的平板，加热丝的功率为 1200W，试分析平板的热分布情况。

注：本算例由于采用的 ANSYS SpaceClaim 平台建模，在这里不详细对建模进行介绍，请读者参考前面章节的内容学习建模方法。

16.4.2 启动 Workbench 并建立分析项目

首先打开 ANSYS WORKBENCH 16.0 程序。在项目工程管理窗口中建立图 16–52 所示项目流程表。

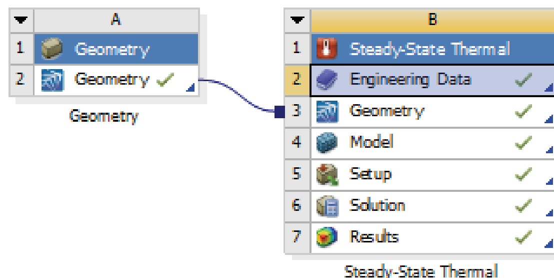


图 16–52 项目管理

16.4.3 定义材料参数

Step1： 双击 A2 项目（Engineering Data）。首先对模型的材料属性进行定义。

Step2： 在 B2 栏中输入材料名称为 MINE，在下面的 Properties of Outline Row 3：MINE 中添加 Isotropic Thermal Conductivity 选项，并输入数值为 1.7367E-07，单位默认即可，如图 16-53 所示。

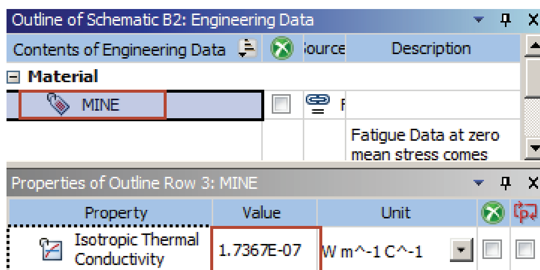


图 16-53 选择材料

Step3： 材料选择完成后单击 Return to Project（回到项目管理区）图标。

16.4.4 导入模型

Step1： 双击项目 A2 项 Geometry（模型）进入 ANSYS SpaceClaim 模块来建立几何模型。如图 16-54 所示。

读者可以直接用 Geom.x_t 文件。

Step2： 关闭 ANSYS SpaceClaim 几何建模平台。

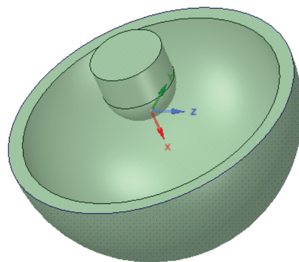


图 16-54 几何模型

16.4.5 划分网格

Step1： 双击项目文件 A4 项 Model（网格），如图 16-55 所示。

Step2： 依次选择 Model（B4）→Geometry→Geom，在 Assignment 栏中选择 MINE 材料属性，如图 16-56 所示。

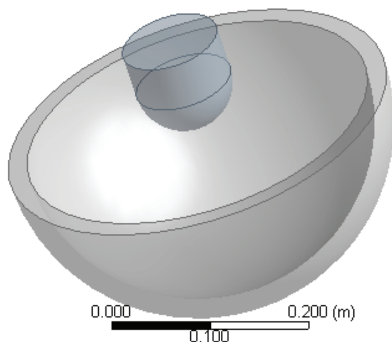


图 16-55 模型

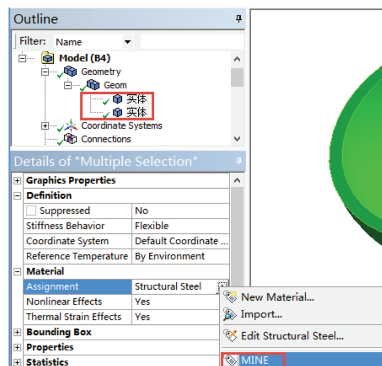


图 16-56 材料属性

Step3：依次选择 Model（B4）→Mesh，在图 16-57 所示窗口中的 Element Size 栏中输入 5.e-003m。

Step4：右键选择 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，经过一段时间，划分完的网格如图 16-58 所示。

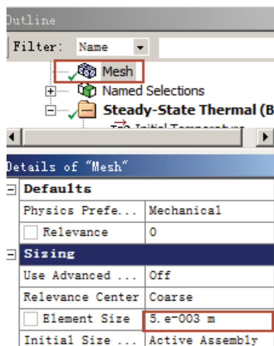


图 16-57 网格大小

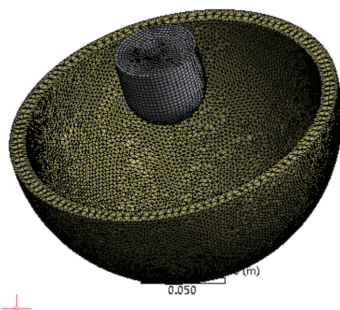


图 16-58 划分网格

Step5：继续查看 Details of “Mesh”（网格的详细信息），在其最下面的 Statistics（统计）中可以看出节点数量为 195203 个，单元数为 101288 个及网格扭曲因子，如图 16-59 所示。

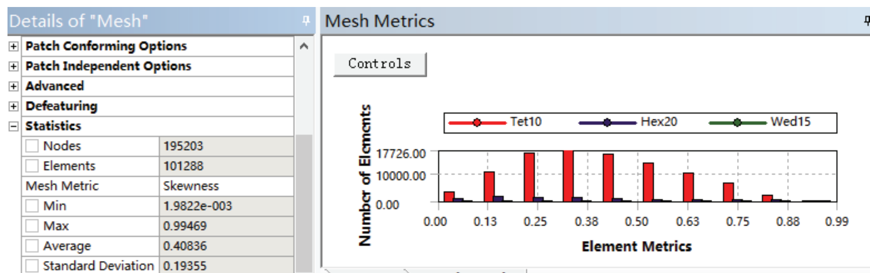


图 16-59 网格数量及扭曲因子

Step6：选择半圆内表面，右键单击后，在弹出的快捷菜单中选择 Named Selection 选项，在对话库中输入 SURF1，单击工具栏中的 Generate 命令；同样操作选择小圆柱外表面命名为 SURF2，如图 16-60 所示。

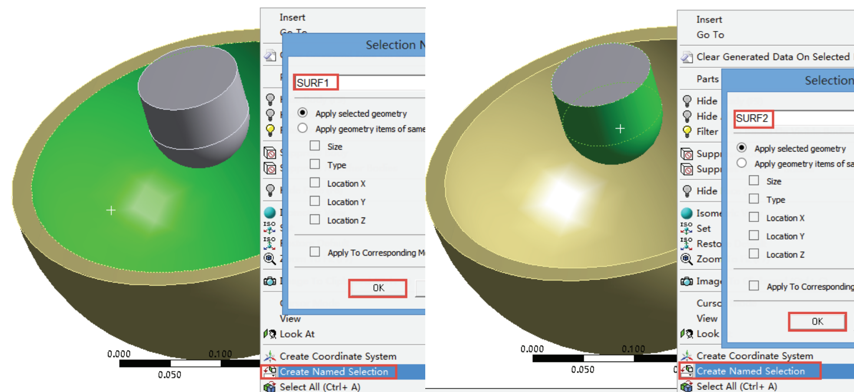


图 16-60 命名



Step7：命名完成后在左侧的模型树中出现图 16-61 所示项目。

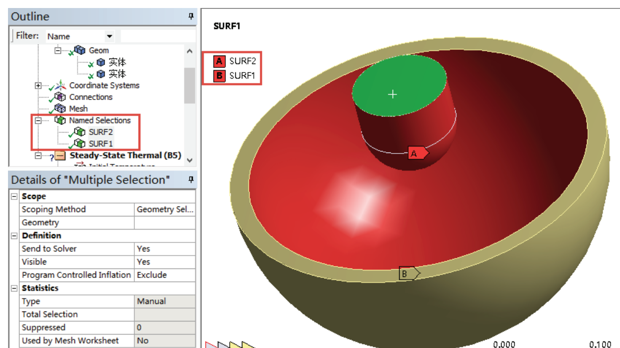


图 16-61　命名后模型

注意：命名的目的是为了在后面插入命令时，方便选取面，请读者在完成后面分析后，体会一下本操作的用处。

16.4.6 定义荷载

Step1：单击 Steady-State Thermal（稳态热分析）A5→Temperature（温度），在 Geometry 栏中保证模型地面被选中，输入温度为 22°，如图 16-62 所示。

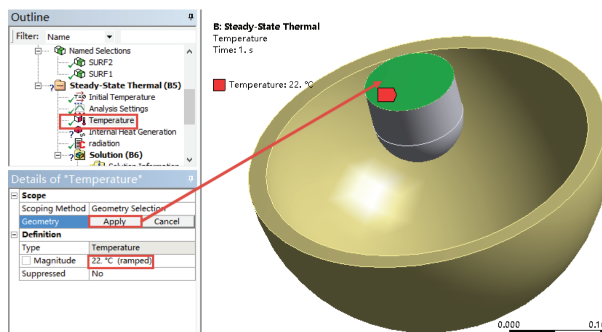


图 16-62　定义温度

Step2：定义功率，选择工具栏中的 Heat→Internal Heat Generation 命令，如图 16-63 所示，选择 4 个圆柱体，在 Magnitude 栏中输入 0.5。

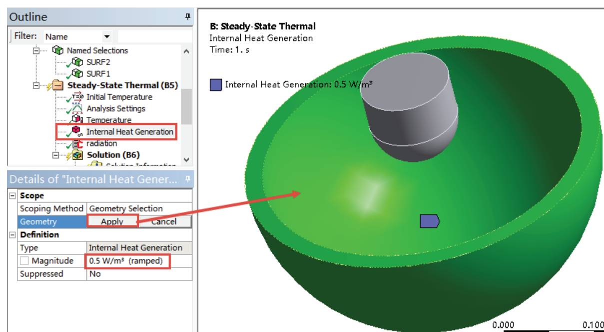


图 16-63　载荷

Step3：插入命令。这部分是本节介绍的重点内容。

右键选择 Steady State Thermal（B5）选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Commands 命令，插入一个命令选项，如图 16-64 所示。

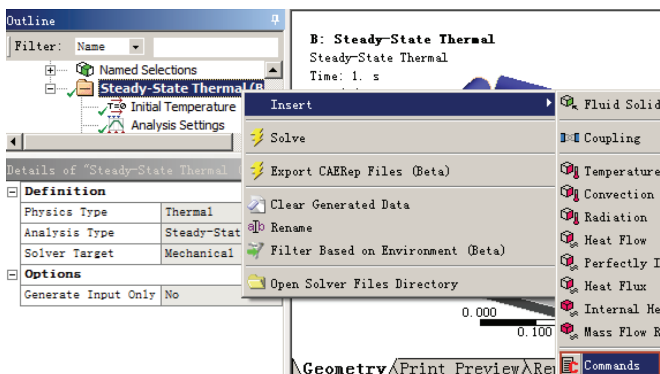


图 16-64 插入命令

Step4：在命令选项中作如下输入，如图 16-65 所示。

sf,SURF1,rdsf,0.7,1

sf,SURF2,rdsf,0.7,1

spctemp,1,100

stef,5.67e-8

radopt,0.9,1.E-5,0,1000,0.1,0.9

toff,273

在输入命令前，请确保单位制为国际单位制。

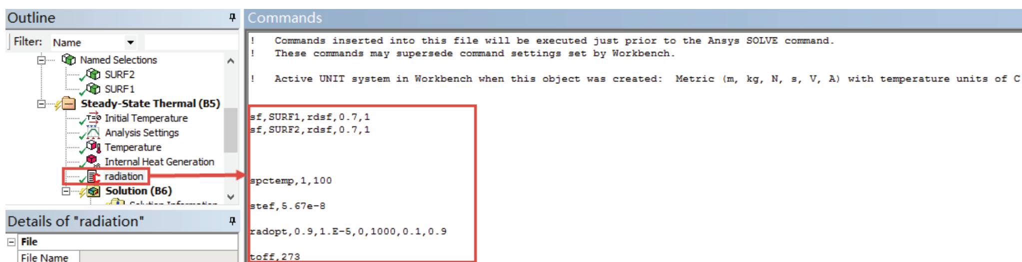


图 16-65 输入命令

16.4.7 求解以后处理

Step1：确认输入参数都正确后单击 Solve （求解）按钮，开始执行此次稳态热分析的求解。

Step2：结果后处理。单击 Thermal（热分析）→Temperature（温度）Total Heat Flux（全部的热流量）。如图 16-66 所示。然后单击 Solve （求解）按钮，几分钟后将出现图 16-67 所示效果。



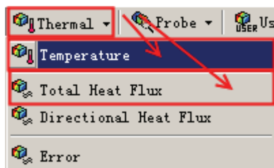


图 16-66　选择后处理项目

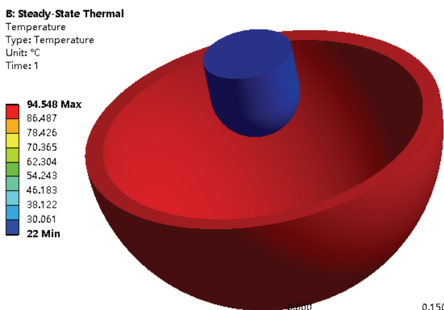


图 16-67　所有实体温度云图

Step3： 图 16-68 显示了热流的结果。

Step4： 图 16-69 显示中心圆柱的温度分布。

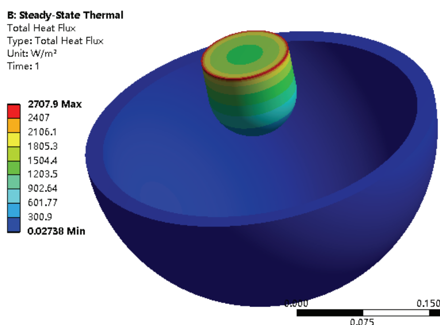


图 16-68　热流云图

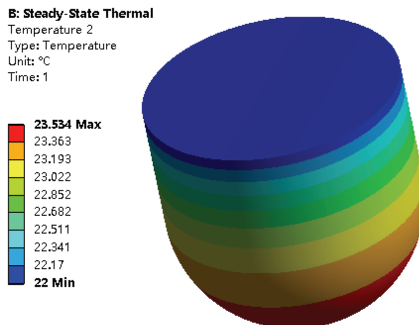


图 16-69　温度云图

16.4.8 保存并退出

Step1： 单击 Mechanical 界面右上角的 （关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step2： 在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save （保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3： 单击右上角的 （关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

热辐射分析在热分析中属于高度非线性分析，在 Workbench 平台中，没有直接的操作进行热辐射分析，需要读者对 APDL 有一定了解。

热辐射分析应用领域比较广泛，可以应用在有辐射加热的行业或领域。

16.5　本章小结

本章通过典型实例分别介绍了稳态热传递、热对流及热辐射的操作过程，在分析过程中考虑了与周围空气的对流换热边界，在后处理工程中得到了温度分布云图及热流密度分布云图。通过本章节的学习，读者应该对 ANSYS Workbench 平台热力学分析的过程有详细的了解。

第 17 章　流体动力学分析

ANSYS Workbench 软件计算流体动力学分析的模块有 ANSYS CFX 和 ANSYS FLUENT 两种，两种计算流体力学软件各有优点。

本章将主要讲解 ANSYS CFX 及 ANSYS LUENT 软件的流体动力学分析流程，包括几何导入、网格划分、前处理和求解及后处理等。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
流体力学基本知识		√		
流体微分方程	√			
ANSYS CFX 计算过程			√	√
ANSYS LUENT 计算过程			√	√
ANSYS ICEPAK 计算过程			√	√

17.1　流体动力学分析简介

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是流体力学的一个分支，它通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关信息，实现了用计算机代替试验装置完成“计算试验”，为工程技术人员提供了实际工况模拟仿真的操作平台，已广泛应用于航空航天、热能动力、土木水利、汽车工程、铁道、船舶工业、化学工程、流体机械和环境工程等领域。

本章将介绍 CFD 一些重要的基础知识，帮助读者熟悉 CFD 的基本理论和基本概念，为计算时设置边界条件、对计算结果进行分析与整理提供参考。

17.1.1　流体动力学分析

1．计算流体动力学介绍

CFD 是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。

CFD 的基本思想可以归结为：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值。CFD 可以看作是在流动基本方程（质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程）控制下对流动的数值模拟。

通过这种数值模拟，可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量（如速度、压力、温度、浓度等）的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定旋涡分布特

性、空化特性及脱流区等。

另外还可据此算出相关的其他物理量，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，与 CAD 联合，还可进行结构优化设计等。CFD 方法与传统的理论分析方法、实验测量方法组成了研究流体流动问题的完整体系。

图 17-1 给出了表征三者之间关系的“三维”流体力学示意图理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础。但是，它往往要求对计算对象进行抽象和简化，才有可能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析结果。

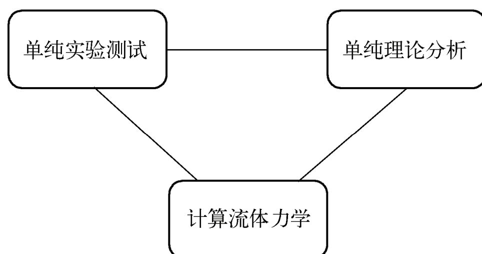


图 17-1 “三维”流体力学示意图

实验测量方法所得到的实验结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不容低估。然而，实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全和测量精度的限制，有时可能很难通过试验法得到结果。此外，实验还会遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等许多困难。

而 CFD 方法恰好克服了前面两种方法的弱点，在计算机上实现一个特定的计算。就好像在计算机上做一次物理实验。例如，机翼的绕流，通过计算并将其结果在屏幕上显示，就可以看到流场的各种细节，如激波的运动、强度，涡的生成与传播，流动的分离、表面的压力分布、受力大小及其随时间的变化等。数值模拟可以形象地再现流动情景，与做实验没有什么区别。

2. 计算流体动力学的特点

CFD 的优势是适应性强、应用面广。首先，流动问题的控制方程，一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，而用 CFD 方法则有可能找出满足工程需要的数值解；其次，可利用计算机进行各种数值试验，例如，选择不同流动参数进行物理方程中各项有效性和敏感性试验，从而方便进行方案比较；再者，它不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的资料，很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。

CFD 也存在一定的局限性。首先，数值解法是一种离散近似的计算方法，依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析表达式，只是有限个离散点上的数值解，并有一定的计算误差；第二，它不像物理模型实验一开始就能给出流动现象并定性地描述，往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数，并需要对建立的数学模型进行验证；第三，程序的编制及资料的收集、整理与正确利用，在很大程度上依赖于经验与技巧。此外，因数值处理方法等原因有可能导致计算结果的不真实，例如，产生数值黏性和频散等伪物理效应。

当然，某些缺点或局限性可通过某种方式克服或弥补，这在本书中会有相应介绍。此外，CFD 因涉及大量数值计算，因此，常需要较高的计算机软硬件配置。

CFD 有自己的原理、方法和特点，数值计算与理论分析、实验观测相互联系、相互促进，但不能完全替代，三者各有各的适用场合。在实际工作中，需要将三者有机结合，争取做到取长补短。

3．计算流体动力学的应用领域

近十多年来，CFD 有了很大的发展，替代了经典流体力学中的一些近似计算法和图解法。过去的一些典型教学实验（如 Reynolds 实验），现在完全可以借助 CFD 手段在计算机上实现。所有涉及流体流动、热交换、分子运输等现象的问题，几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。

CFD 不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括：

- 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动。
- 飞机和航天飞机等飞行器的设计。
- 汽车流线外形对性能的影响。
- 洪水波及河口潮流计算。
- 风载荷对高层建筑物稳定性及结构性能的影响。
- 温室及室内的空气流动及环境分析。
- 电子元器件的冷却。
- 换热器性能分析及换热器片形状的选取。
- 河流中污染物的扩散。
- 汽车尾气对街道环境的污染。
- 食品中细菌的运移。

对这些问题的处理，过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决，CFD 技术现已发展到完全可以分析三维黏性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

4．计算流体动力学的分支

经过多年的发展，CFD 出现了多种数值解法。这些方法之间的主要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同，CFD 大体上可分为 3 个分支：

- 有限差分法（Finite Difference Method，FDM）。
- 有限元法（Finite Element Method，FEM）。
- 有限体积法（Finite Volume Method，FVM）。

有限差分法是应用最早、最经典的 CFD 方法，它将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，然后将偏微分方程的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求出差分方程组的解，就是微分方程定解问题的数值近似解。它是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。这种方法发展较早，比较成熟，较多地用于求解双曲形和抛物形问题。在此基础上发展起来的方法有 PIC（Particle-In-Cell）法、MAC（Marker-And-Cell）法，以及由美籍华人学者陈景仁提出的有限分析法（Finite Analytic Method）等有限元法是 20 世纪 80 年代开始应用的一种数值解法，它吸收了有限差分法中离散处理的内核，又采用了变分计算中选择逼近函数对区域进行积分的合理方法。

有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢，因此应用不是特别广泛。在有限元法的基础上，英国 C.A.Brebbia 等提出了边界元法和混合元法等方法。

有限体积法是将计算区域划分为一系列控制体积，将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。有限体积法的关键是在导出离散方程过程中，需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布做出某种形式的假定，用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数物理意义明确，计算量相对较小。

17.1.2 CFD 基础

1．流体的连续介质模型

- 流体质点（Fluid Particle）：几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。
- 连续介质（Continuum/Continuous Medium）：质点连续地充满所占空间的流体或固体。
- 连续介质模型（Continuum/Continuous Medium Model）：把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型，$u=u(t,x,y,z)$。

2．流体的性质

（1）惯性

惯性（Fluid Inertia）指流体不受外力作用时，保持其原有运动状态的属性。惯性与质量有关，质量越大，惯性就越大。单位体积流体的质量称为密度（density），以 r 表示，单位为 kg/m^3。对于均质流体，设其体积为 V，质量为 m，则其密度为：

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{17-1}$$

对于非均质流体，密度随点而异。若取包含某点在内的体积 ΔV，其中质量 Δm，则该点密度需要用极限方式表示，即：

$$\rho=\lim_{\Delta V\to 0}\frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{17-2}$$

（2）压缩性

作用在流体上的压力变化可引起流体的体积变化或密度变化，这一现象称为流体的可压缩性。压缩性（Compressibility）可用体积压缩率 k 来量度：

$$k=-\frac{\mathrm{d}V/V}{\mathrm{d}p}=\frac{\mathrm{d}\rho/\rho}{\mathrm{d}p} \tag{17-3}$$

式中，p 为外部压强。

在研究流体流动过程中，若考虑到流体的压缩性，则称为可压缩流动，相应地称流体为可压缩流体，例如，高速流动的气体。若不考虑流体的压缩性，则称为不可压缩流动，相应地称流体为不可压缩流体，如水、油等。

（3）黏性

黏性（Viscosity）指在运动的状态下，流体所产生的抵抗剪切变形的性质。黏性大小由黏度来量度。流体的黏度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。黏度有动力黏度 μ 和运动黏度 ν 之分。动力黏度由牛顿内摩擦定律导出：

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{17-4}$$

式中，τ 为切应力，单位为 Pa；μ为动力黏度，单位为 Pa·s；$\mathrm{d}u/\mathrm{d}y$ 为流体的剪切变形速率。

运动黏度与动力黏度的关系为：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{17-5}$$

式中，ν 为运动黏度，单位为 m^2/s。

在研究流体流动过程中，考虑流体的黏性时，称为黏性流动，相应的流体称为黏性流体；当不考虑流体的黏性时，称为理想流体的流动，相应的流体称为理想流体。

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，将流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体严格满足牛顿内摩擦定律且 μ 保持为常数。非牛顿流体的切应力与速度梯度不成正比，一般又分为塑性流体、假塑性流体、胀塑性流体 3 种。

塑性流体，如牙膏等，它们有一个保持不产生剪切变形的初始应力 τ_0，只有克服了这个初始应力后，其切应力才与速度梯度成正比，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{17-6}$$

假塑性流体，如泥浆等，其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \right)^n, \quad n < 1 \tag{17-7}$$

胀塑性流体，如乳化液等，其切应力与速度梯度的关系是：

$$\tau = \mu \left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \right)^n, \quad n > 1 \tag{17-8}$$

3．流体力学中的力与压强

（1）质量力

与流体微团质量大小有关并且集中在微团质量中心的力称为质量力（body force）。在重力场中有重力 mg；直线运动时，有惯性力 ma。质量力是一个矢量，一般用单位质量所具有的质量力来表示，其形式如下：

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \tag{17-9}$$

式中，f_x，f_y，f_z 为单位质量力在各轴上的投影。

（2）表面力

大小与表面面积有关而且分布作用在流体表面上的力称为表面力（surface force）。表面力按其作用方向可以分为两种：一是沿表面内法线方向的压力，称为正压力；另一种是沿表面切向的摩擦力，称为切向力。

对于理想流体的流动，流体质点只受到正压力，没有切向力；对于黏性流体的流动，流体质点所受到的作用力既有正压力，也有切向力。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力。单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强具有两个特征：

■ 静压强的方向垂直指向作用面。

■ 流场内一点处静压强的大小与方向无关。

（3）表面张力

在液体表面，界面上液体间的相互作用力称为张力。在液体表面有自动收缩的趋势，收缩的液面存在相互作用的与该处液面相切的拉力，称为液体的表面张力（Surface Tension）。正是这种力的存在，引起弯曲液面内外出现压强差以及常见的毛细现象等。

试验表明，表面张力大小与液面的截线长度 L 成正比，即：

$$T = \sigma L \tag{17-10}$$

式中：σ 为表面张力系数，它表示液面上单位长度截线上的表面张力，其大小由物质种类决定，其单位为 N/m。

（4）绝对压强、相对压强及真空度

标准大气压的压强是 101325Pa（760mm 汞柱），通常用 p_{atm} 表示。若压强大于大气压，则以该压强为计算基准得到的压强称为相对压强（Relative Pressure），也称为表压强，通常用 p_r 表示。若压强小于大气压，则压强低于大气压的值就称为真空度（Vacuum），通常用 p_v 表示。如以压强 0Pa 为计算的基准，则这个压强就称为绝对压强（Absolute Pressure），通常用 p_s 表示。这三者的关系如下：

$$p_r = p_s - p_{atm} \tag{17-11}$$

$$p_v = p_{atm} - p_s \tag{17-12}$$

在流体力学中，压强都用符号 p 表示，但一般来说有一个约定：对于液体，压强用相对压强；对于气体，特别是马赫数大于 0.1 的流动，应视为可压缩流，压强用绝对压强。

压强的单位较多，一般用 Pa，也可用 bar，还可以用汞柱、水柱表示。

（5）静压、动压和总压

对于静止状态下的流体，只有静压强。对于流动状态的流体，有静压强（Static Pressure）、动压强（Dynamic Pressure）、测压管压强（Manometric Tube Pressure）和总压强（Total Pressure）之分。下面从伯努利（Bernoulli）方程（也有人称其为伯努里方程）中分析它们的意义。

伯努利方程阐述一条流线上流体质点的机械能守恒，对于理想流体的不可压缩流动其表达式如下：

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \tag{17-13}$$

式中，$p/\rho g$ 称为压强水头，也是压能项，为静压强；$v^2/2g$ 称为速度水头，也是动能项；z 称为位置水头，也是重力势能项，这 3 项之和就是流体质点的总的机械能；H 称为总的水头高。

将式（17-13）两边同时乘以 ρg，则有

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \tag{17-14}$$

式中，p 称为静压强，简称静压；$\frac{1}{2}\rho v^2$ 称为动压强，简称动压；ρgH 称为总压强，简称总压。对于不考虑重力的流动，总压就是静压和动压之和。

4．流体运动的描述

（1）流体运动描述的方法

描述流体物理量有两种方法，一种是拉格朗日描述；一种是欧拉描述。

拉格朗日（Lagrange）描述也称随体描述，它着眼于流体质点，并将流体质点的物理量认为是随流体质点及时间变化的，即把流体质点的物理量表示为拉格朗日坐标及时间的函数。设拉格朗日坐标为（a,b,c），以此坐标表示的流体质点的物理量，如矢径、速度、压强等在任一时刻 t 的值，便可以写为 a、b、c 及 t 的函数。

若以 f 表示流体质点的某一物理量，其拉格朗日描述的数学表达式为：

$$f = f(a,b,c,t) \tag{17-15}$$

例如，设时刻 t 流体质点的矢径即 t 时刻流体质点的位置以 r 表示，其拉格朗日描述为：

$$r = r(a,b,c,t) \tag{17-16}$$

同样，质点的速度的拉格朗日描述是：

$$v = v(a,b,c,t) \tag{17-17}$$

欧拉描述（也称空间描述）着眼于空间点，认为流体的物理量随空间点及时间而变化，即把流体物理量表示为欧拉坐标及时间的函数。

设欧拉坐标为（q_1,q_2,q_3），用欧拉坐标表示的各空间点上的流体物理量（如速度、压强等）在任一时刻 t 的值，可写为 q_1、q_2、q_3 及 t 的函数。

从数学分析知道，当某时刻一个物理量在空间的分布一旦确定，该物理量在此空间形成一个场。因此，欧拉描述实际上描述了一个个物理量的场。

若以 f 表示流体的一个物理量，其欧拉描述的数学表达式是（设空间坐标取用直角坐标）：

$$f = F(x,y,z,t) = F(r,t) \tag{17-18}$$

如流体速度的欧拉描述是

$$v = v(x,y,z,t) \tag{17-19}$$

（2）拉格朗日描述与欧拉描述之间的关系

拉格朗日描述着眼于流体质点，将物理量视为流体坐标与时间的函数；欧拉描述着眼于空间点，将物理量视为空间坐标与时间的函数。它们可以描述同一物理量，必定互相相关。设表达式 $f = f(a,b,c,t)$ 表示流体质点(a,b,c)在 t 时刻的物理量；表达式 $f = F(x,y,z,t)$ 表示空间点(x,y,z)在时刻 t 的同一物理量。如果流体质点(a,b,c)在 t 时刻恰好运动到空间点(x,y,z)上，则应有

$$\begin{cases} x = x(a,b,c,t) \\ y = y(a,b,c,t) \\ z = z(a,b,c,t) \end{cases} \tag{17-20}$$

$$F(x,y,z,t)=f(a,b,c,t) \tag{17-21}$$

事实上，将式（17-16）代入式（17-21）左端，即有：

$$\begin{aligned}F(x,y,z,t)&=F[x(a,b,c,t),y(a,b,c,t),z(a,b,c,t),t]\\&=f(a,b,c,t)\end{aligned} \tag{17-22}$$

或者反解式（17-16），得到：

$$\begin{cases}a=a(x,y,z,t)\\b=b(x,y,z,t)\\c=c(x,y,z,t)\end{cases} \tag{17-23}$$

将式（17-23）代入式（17-21）的右端，也应有：

$$\begin{aligned}f(a,b,c,t)&=f[a(x,y,z,t),b(x,y,z,t),c(x,y,z,t),t]\\&=F(x,y,z,t)\end{aligned} \tag{17-24}$$

由此，可以通过拉格朗日描述推出欧拉描述，同样也可以由欧拉描述推出拉格朗日描述。

（3）随体导数

流体质点物理量随时间的变化率称为随体导数（Substantial Derivative），或物质导数、质点导数。

按拉格朗日描述，物理量 f 表示为 $f=f(a,b,c,t)$，f 的随体导数就是跟随质点(a,b,c)的物理量f对时间 t 的导数$\partial f/\partial t$。例如，速度$v(a,b,c,t)$是矢径$r(a,b,c,t)$对时间的偏导数：

$$v(a,b,c,t)=\frac{\partial r(a,b,c,t)}{\partial t} \tag{17-25}$$

即随体导数就是偏导数。

按欧拉描述，物理量 f 表示为 $f=F(x,y,z,t)$，但$\partial F/\partial t$并不表示随体导数，它只表示物理量在空间点(x,y,z,t)上的时间变化率。而随体导数必须跟随 t 时刻位于(x,y,z,t)空间点上的那个流体质点，其物理量f的时间变化率。

由于该流体质点是运动的，即 x、y、z 是变的，若以 a、b、c 表示该流体质点的拉格朗日坐标，则 x、y、z 将依式（17-16）变化，从而 $f=F(x,y,z,t)$的变化依连锁法则处理。因此，物理量 $f=F(x,y,z,t)$的随体导数是：

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{D}F(x,y,z,t)}{\mathrm{D}t}&=\mathrm{D}F[x(a,b,c,t),y(a,b,c,t),z(a,b,c,t),t]\\&=\frac{\partial F}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial t}\\&=\frac{\partial F}{\partial x}u+\frac{\partial F}{\partial y}v+\frac{\partial F}{\partial z}w+\frac{\partial F}{\partial t}\\&=(v\cdot\nabla)F+\frac{\partial F}{\partial t}\end{aligned} \tag{17-26}$$

式中，$\mathrm{D}/\mathrm{D}t$ 表示随体导数。

从中可以看出，对于质点物理量的随体导数，欧拉描述与拉格朗日描述大不相同。前者是两者之和，而后者是直接的偏导数。

（4）定常流动与非定常流动

根据流体流动过程以及流动过程中的流体的物理参数是否与时间相关，可将流动分为定常流动（Steady Flow）与非定常流动（Unsteady Flow）。

- 定常流动：流体流动过程中各物理量均与时间无关，这种流动称为定常流动。
- 非定常流动：流体流动过程中某个或某些物理量与时间有关，则这种流动称为非定常流动。

（5）流线与迹线

常用流线和迹线来描述流体的流动。

- 迹线（Track）：随着时间的变化，空间某一点处的流体质点在流动过程中所留下的痕迹称为迹线。在 t=0 时刻，位于空间坐标(a,b,c)处的流体质点，其迹线方程为：

$$\begin{cases} \mathrm{d}x(a,b,c,t)=u\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}y(a,b,c,t)=v\mathrm{d}t \\ \mathrm{d}z(a,b,c,t)=w\mathrm{d}t \end{cases} \tag{17-27}$$

式中，u、v、w 分别为流体质点速度的 3 个分量；x、y、z 为在 t 时刻此流体质点的空间位置。

- 流线（Streamline）：在同一个时刻，由不同的无数多个流体质点组成的一条曲线，曲线上每一点处的切线与该质点处流体质点的运动方向平行。流场在某一时刻 t 的流线方程为：

$$\frac{\mathrm{d}x}{u(x,y,z,t)}=\frac{\mathrm{d}y}{v(x,y,z,t)}=\frac{\mathrm{d}z}{w(x,y,z,t)} \tag{17-28}$$

对于定常流动，流线的形状不随时间变化，而且流体质点的迹线与流线重合。在实际流场中除驻点或奇点外，流线不能相交，不能突然转折。

（6）流量与净通量

- 流量（Flux）：单位时间内流过某一控制面的流体体积称为该控制面的流量 Q，其单位为 m^3/s。若单位时间内流过的流体是以质量计算，则称为质量流量 Q_m；不加说明时“流量”一词概指体积流量。在曲面控制面上有：

$$Q=\iint_A v\cdot n\mathrm{d}A \tag{17-29}$$

- 净通量（Net Flux）：在流场中取整个封闭曲面作为控制面 A，封闭曲面内的空间称为控制体。流体经一部分控制面流入控制体，同时也有流体经另一部分控制面从控制体中流出，此时流出的流体减去流入的流体，所得出的流量称为流过全部封闭控制面 A 的净流量（或净通量），通过式（17-30）计算：

$$\rho\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t}=\rho F_b+\mathrm{div}P-a_\mathrm{c}-2\Omega v_\mathrm{r} \tag{17-30}$$

对于不可压缩流体来说，流过任意封闭控制面的净通量等于 0。

（7）有旋流动与有势流动

由速度分解定理，流体质点的运动可以分解为：

- 随同其他质点的平动。
- 自身的旋转运动。

■ 自身的变形运动拉伸变形和剪切变形。

在流动过程中，若流体质点自身做无旋运动（Irrotational Flow），则称流动是无旋的，也就是有势的，否则就称流动是有旋流动（Rotational Flow）。流体质点的旋度是一个矢量，通常用$\boldsymbol{\omega}$表示，其大小为：

$$\omega=\frac{1}{2}\begin{vmatrix} i & j & k \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \tag{17-31}$$

若$\omega=0$，则称流动为无旋流动，否则就是有旋流动。

ω与流体的流线或迹线形状无关；黏性流动一般为有旋流动；对于无旋流动，伯努利方程适用于流场中任意两点之间；无旋流动也称为有势流动（Potential Flow），即存在一个势函数$\varphi(x,y,z,t)$，满足：

$$V=\text{grad}\varphi \tag{17-32}$$

即

$$u=\frac{\partial\varphi}{\partial x},\quad v=\frac{\partial\varphi}{\partial y},\quad w=\frac{\partial\varphi}{\partial z} \tag{17-33}$$

（8）层流与湍流

流体的流动分为层流流动（Laminar Flow）和湍流流动（Turbulent Flow）。从试验的角度来看，层流流动就是流体层与层之间相互没有任何干扰，层与层之间既没有质量的传递也没有动量的传递；而湍流流动中层与层之间相互有干扰，而且干扰的力度还会随着流动而加大，层与层之间既有质量的传递又有动量的传递。

判断流动是层流还是湍流，是看其雷诺数是否超过临界雷诺数。雷诺数的定义如下：

$$Re=\frac{VL}{\nu} \tag{17-34}$$

式中，V为截面的平均速度；L为特征长度；ν为流体的运动黏度。

对于圆形管内流动，特征长度L取圆管的直径d。一般认为临界雷诺数为2320，即：

$$Re=\frac{vd}{\nu} \tag{17-35}$$

当$Re<2320$时，管中是层流；当$Re>2320$时，管中是湍流。

对于异型管道内的流动，特征长度取水力直径d_{H}，则雷诺数的表达式为：

$$Re=\frac{Vd_{\mathrm{H}}}{\nu} \tag{17-36}$$

异型管道水力直径的定义如下：

$$d_{\mathrm{H}}=4\frac{A}{S} \tag{17-37}$$

式中，A为过流断面的面积；S为过流断面上流体与固体接触的周长。

临界雷诺数根据形状的不同而有所差别。根据试验，几种异型管道的临界雷诺数见表17-1。

表 17-1 几种异型管道的临界雷诺数

管道截面形状	正方形	正三角形	偏心缝隙
$Re=\frac{Vd_{\rm H}}{\nu}$	$\frac{Va}{\nu}$	$\frac{Va}{\sqrt{3}\nu}$	$\frac{V}{\nu}(D-d)$
Re_c	2070	1930	1000

对于平板的外部绕流，特征长度取沿流动方向的长度，其临界雷诺数为 5×10^5～3×10^6。

17.2 流体动力学实例——CFX 旋转机械流场分析

ANSYS CFX 是 ANSYS 公司的模拟工程实际传热与流动问题的商用程序包，是全球第一个在复杂几何、网格、求解这 3 个 CFD 传统瓶颈问题上均获得重大突破的商用 CFD 软件包，其特点如下：

1）精确的数值方法：CFX 采用了基于有限元的有限体积法，在保证了有限体积法的守恒特性的基础上，还吸收了有限元法的数值精确性。

2）快速稳健的求解技术：CFX 是全球第一个发展和使用全隐式多网格耦合求解技术的商业化程序包，这种革命性的求解技术克服了传统算法需要“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程，可以同时求解动量方程和连续性方程。

3）丰富的物理模型：CFX 程序包拥有包括流体流动、传热、辐射、多项流、化学反应、燃烧等问题的丰富的通用物理模型；还拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等大量复杂现象的实用模型。

4）领先的流固耦合技术：借助于 ANSYS 在多物理场方面深厚的技术基础，及 CFX 在流体力学分析方面的领先优势，ANSYS CFX 推出了目前世界上最优秀的流固耦合（FSI）技术，能够完成流固单向耦合及流固双向耦合分析。

5）集成环境与优化技术：ANSYS Workbench 平台提供了从分析开始到结束的统一环境，使用者的工作效率得到了提高。在 ANSYS Workbench 平台下，所有设置都是统一的，并且可以与 CAD 数据相互关联，并进行参数化传递。

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的流体动力学分析 ANSYS BladeGen、TurboGrid 和 ANSYS CFX 3 个模块，计算旋转机械建模和流场分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS BladeGen、TurboGrid 及 CFX 3 个模块进行叶片流场分析的基本方法及操作过程。

模型文件	无
结果文件	网盘\Chapter17\char17-1\pipe.wbpj

17.2.1 问题描述

利用 BladeGen 模块建立叶片模型并在 CFX 中进行流体分析。



17.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→BladeGen 选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 17-2 所示。

Step3：同样的操作方法调用 TurboGrid 模块，并将 A2（Blade Design）连接到 B2（Turbo Mesh），如图 17-3 所示。

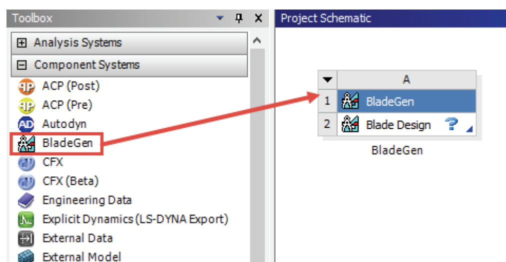


图 17-2　BladeGen 模块

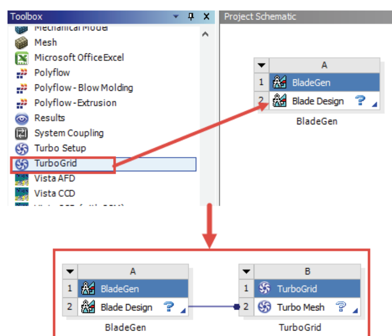


图 17-3　TurboGrid 模块

Step4：同样的操作方法调用 CFX 模块，并将 B2（Turbo Mesh）连接到 C2（Setup），如图 17-4 所示。

注：BladeGen 用来建立旋转机械模型，TurboGrid 用来划分旋转机械网格， CFX 用来求解，后处理及查看结果。

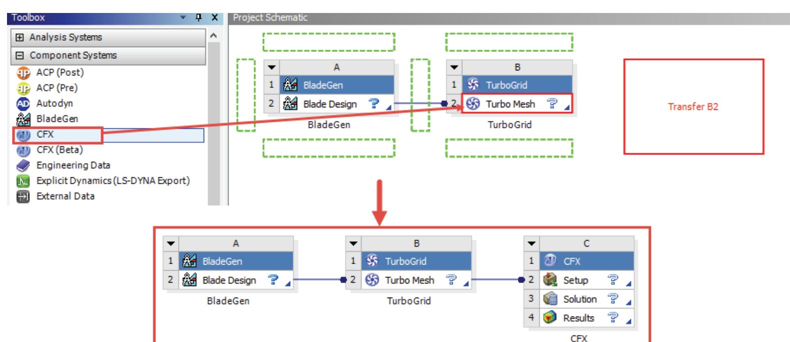


图 17-4　CFX 模块

17.2.3 BladeGen 中设置

Step1：右键单击 A2（BladeGen），在弹出的图 17-5 所示的快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step2：此时启动图 17-6 所示的 BladeGen 程序界面，在此界面中完成旋转机械模型的创建。

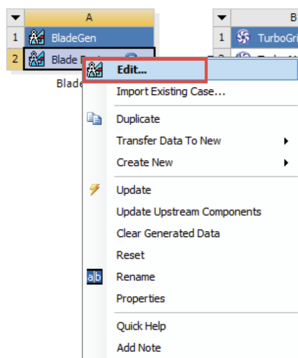


图 17-5 快捷菜单

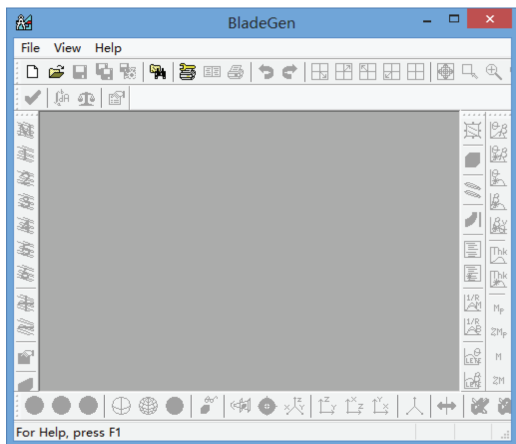


图 17-6 BladeGen 界面

Step3： 单击工具栏中的新建图标，此时弹出图 17-7 所示的 Initial Meridional Configuration Dialog 对话框。

Step4： 在选项卡中选择 Normal Axial 子选项卡，进行如下设置并单击 OK 按钮，如图 17-8 所示。

左上侧：Z：-15、R：80；

右上侧：Z：65、R：120；

左下侧：Z：-15、R：60；

右下侧：Z：65、R：60；

在右下角位置的 Mode 选项卡中选择 Ang/Thk 选项。

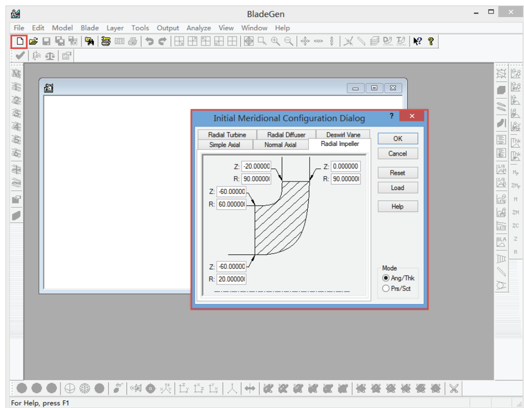


图 17-7 弹出对话框

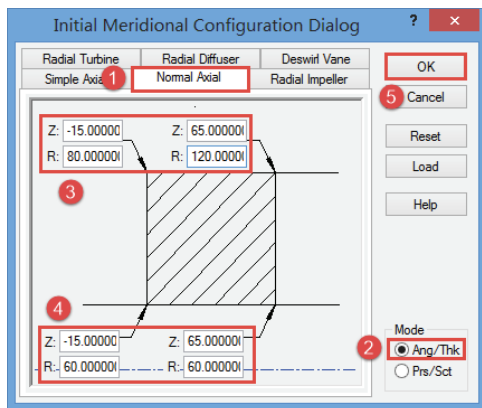


图 17-8 参数设置

Step5： 在弹出的 Initial Angle/Thickness Dialog 对话框中进行如下设置并单击 OK 按钮，如图 17-9 所示。

高度上输入 15；在右侧的#Blades 栏中输入 13。

在#Layers 中的 Ang 中输入 5；Thk 中输入 3。

Step6： 此时 BladeGen 中将绘制出图 17-10 所示的几何图形。

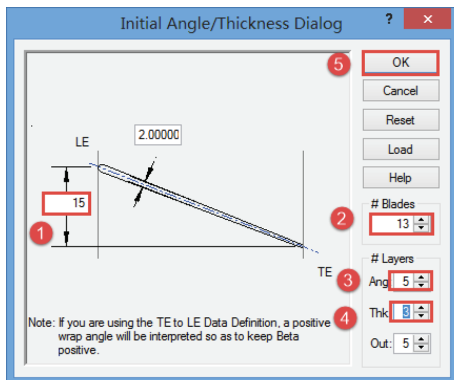


图 17-9　在新对话框设置参数

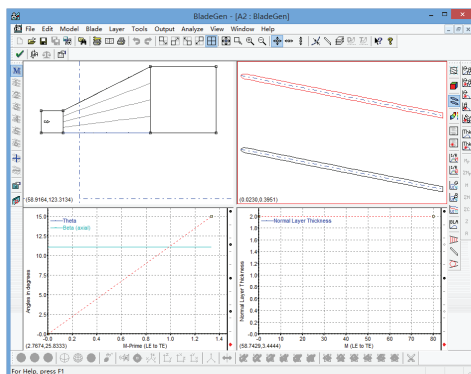


图 17-10　图形

Step7：依次选择菜单 Model→Properties…，在弹出的图 17-11 所示的 Model Property Dialog 对话框中进行如下设置并单击 OK 按钮。

在 Component Type 栏中选择 Fan 选项。

在 Model Units 栏中选择单位为 MM。

Step8：依次选择菜单 Blade→Properties…，在弹出的图 17-12 所示的 Blade Property Dialog 对话框中进行如下设置并单击 OK 按钮。

选择 LE/TE Ellipse 选项卡。

在 TE Type 栏中选择 Ellipse 选项。

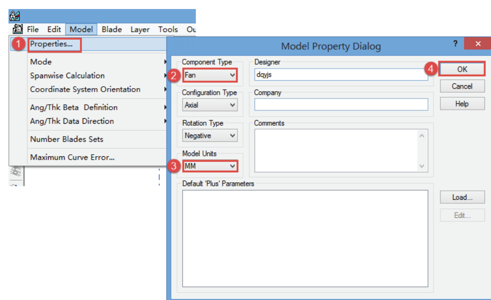


图 17-11　Model Property Dialog 对话框

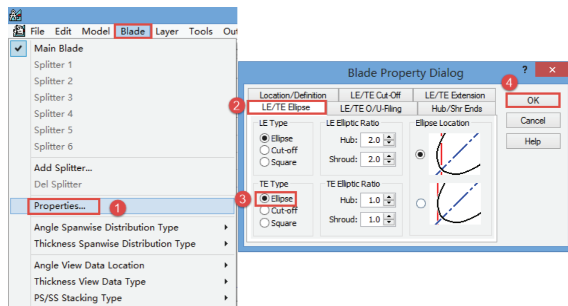


图 17-12　Blade Property Dialog 对话框

Step9：单击右侧工具栏中的图标，此时几何将以三维网格形式显示出来，如图 17-13 所示。

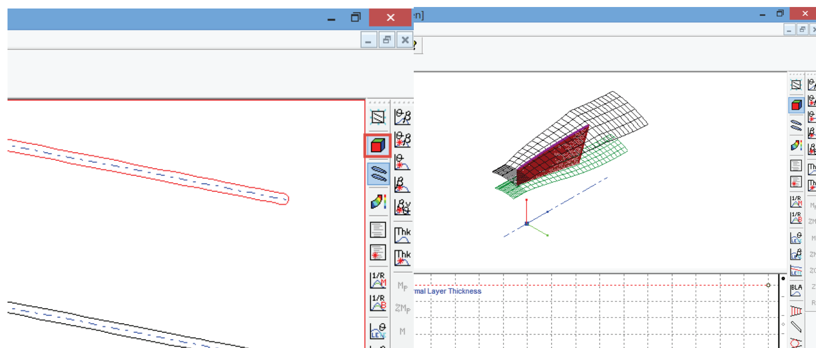


图 17-13　三维显示

Step10：单击右侧工具栏中的图标，此时几何将以全三维网格形式显示出来，如图 17-14 所示。

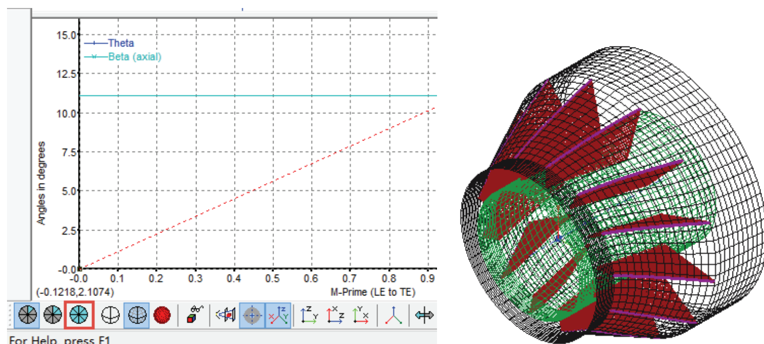


图 17-14　全三维网格显示

Step11：单击右侧工具栏中的图标，此时几何将以全三维模型形式显示出来如图 17-15 所示。

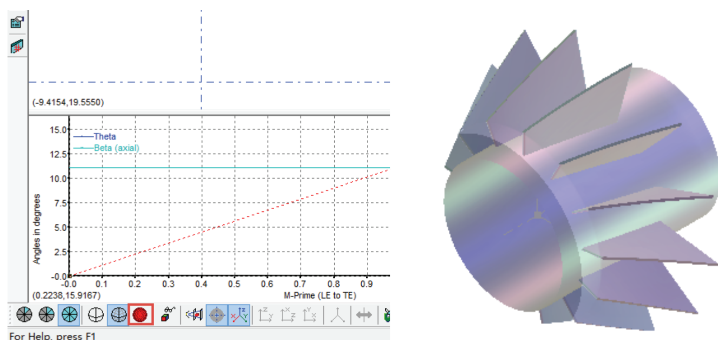
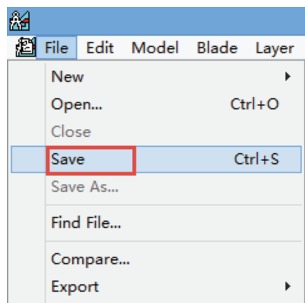


图 17-15　三维显示

Step12：依次选择 File→Save，保存文件并关闭 BladeGen 界面，如图 17-16 所示。

17.2.4 TurboGrid 中设置

Step1：右键单击 B2（Turbo Mesh），在弹出的图 17-17 所示的快捷菜单中选择 Edit…选项。



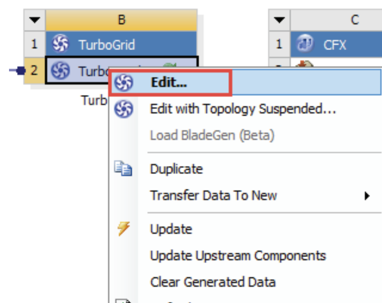


图 17-16　保存文件

17-17　快捷菜单

Step2：此时启动图 17-18 所示的 TurboGrid 程序界面，并显示了设置好的旋转机械模型。

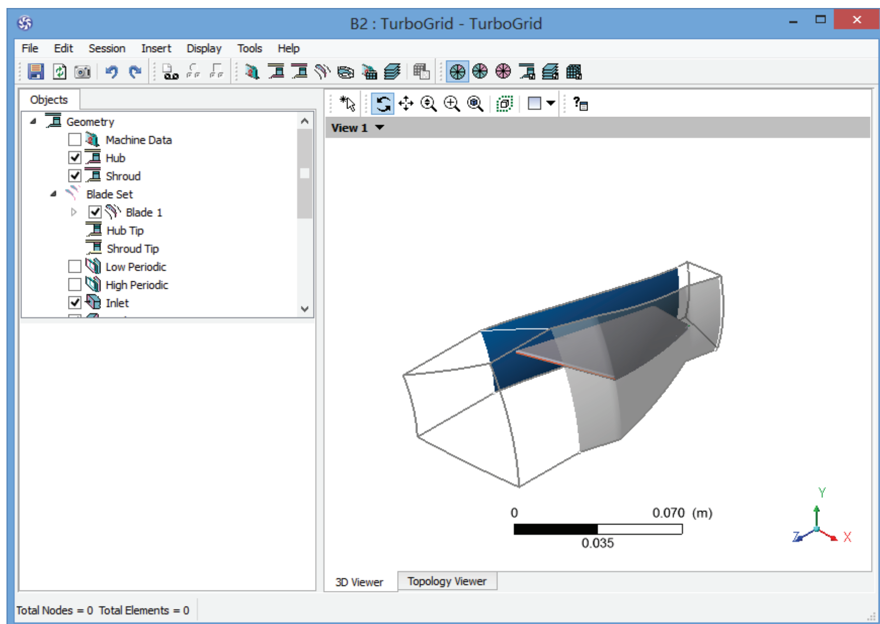


图 17-18　TurboGrid 程序界面

Step3：右键单击左侧模型树中 Shroud Tip 选项，在弹出的图 17-19 所示的快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step4：此时在模型树的下方将出现图 17-20 所示的 Details of Shroud Tip 选项卡，在此选项卡中进行如下设置并单击 Apply 按钮。

勾选 Override Upstream GeometryOptions 复选框。

在 Tip Option 栏中选择 Constant Span 选项卡。

在 Span 栏中输入 0.95。

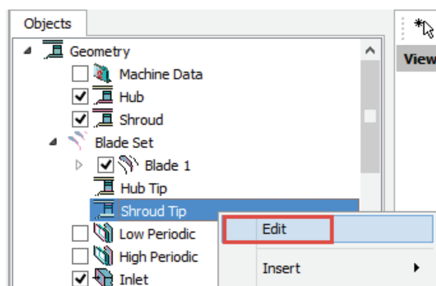


图 17-19　快捷菜单

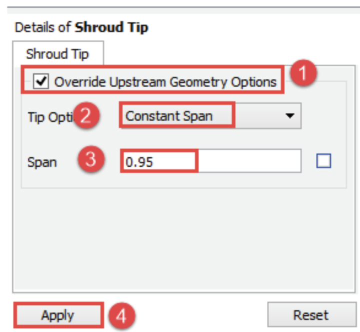


图 17-20　参数设置

Step5：此时模型将显示部分网格图形，在左侧的模型树中右键选择 Topology Set 选项，在弹出的图 17-21 所示的快捷菜单中取消选择 Suspend Object Updates 选项。

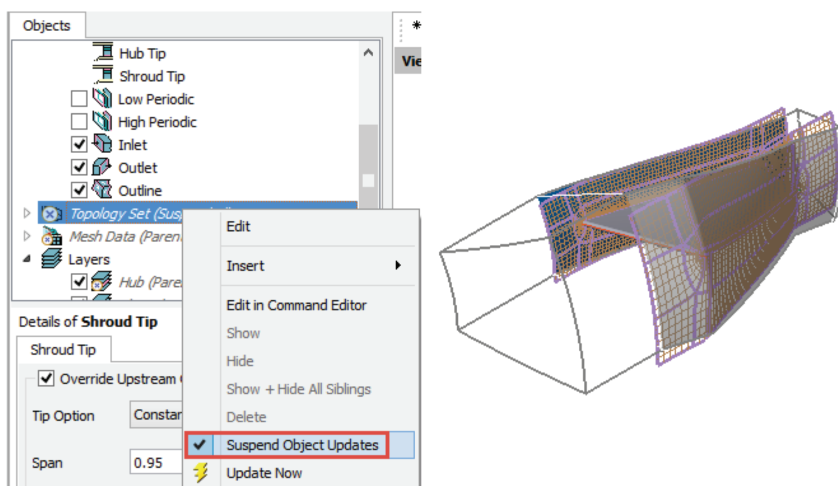


图 17-21 图形及设置

Step6：在左侧的模型树中右键选择 Topology Set 选项，在弹出的图 17-22 所示的快捷菜单中选择 Edit 选项。

Step7：在弹出的 Details of Topology Set 中进行如下设置并单击 Apply 按钮，如图 17-23 所示。

选择 Definition 选项卡。

在 Placement 栏中选择 ATM Optimized 选项卡。

在 Method 栏中选择 Automatic 选项。

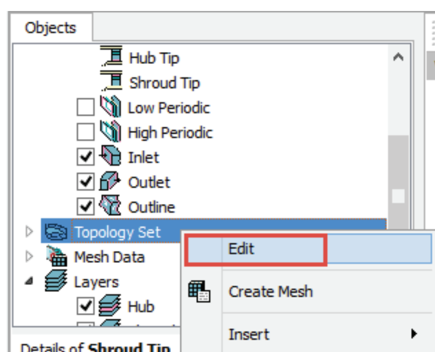


图 17-22 快捷菜单 1

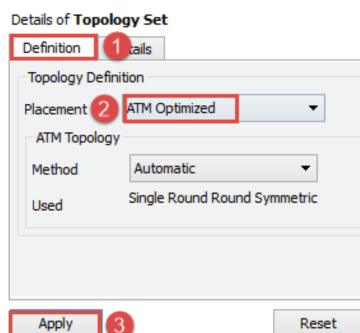


图 17-23 设置参数 1

Step8：在左侧的模型树中右键选择 Mesh Data 选项，在弹出的图 17-24 所示的快捷菜单中选择 Edit 选项。

Step9：在弹出的 Details of Mesh Data 中进行如下设置并单击 Apply 按钮，如图 17-25 所示：

选择 Mesh Size 选项卡。

在 Method 栏中选择 Target Passage MeshSize 选项。

在 Node Code 栏中选择 Fine（250000）选项。

勾选 Inlet Domain 和 Outlet Domain 两个选项。

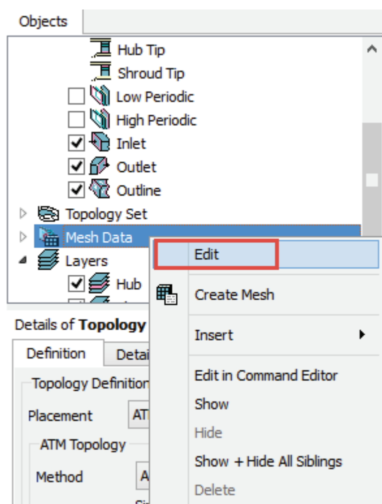


图 17-24　快捷菜单 2

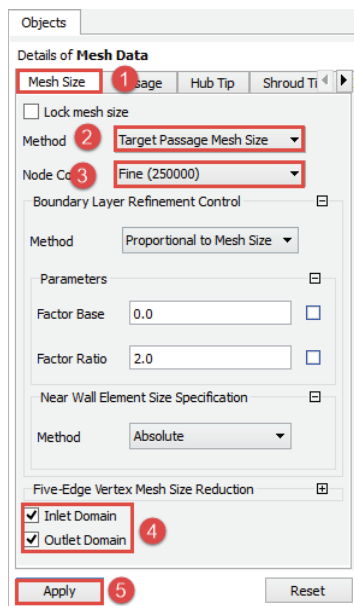


图 17-25　设置参数 2

Step10：在左侧的模型树中右键选择 Mesh Data 选项，在弹出的图 17-26 所示的快捷菜单中选择 Create Mesh 选项。

Step11：此时旋转机械网格模型如图 17-27 所示，保存文件并关闭 TurboGrid 平台。

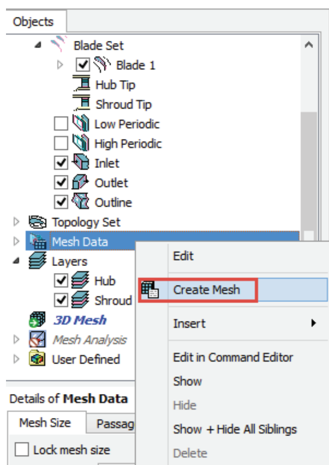


图 17-26　快捷菜单 3

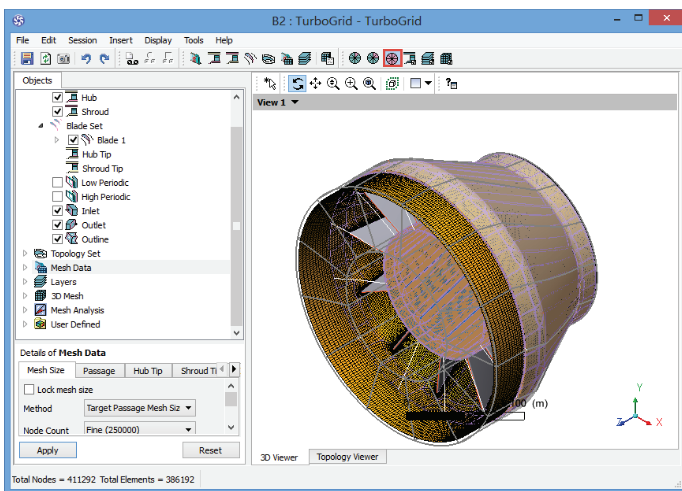


图 17-27　网格模型

17.2.5　CFX 中设置

Step1：右键单击 C2（Setup）按钮，在弹出的图 17-28 所示的快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step2：此时启动图 17-29 所示的 CFX 程序界面，依次选择菜单 Tools→Turbo Mode…。

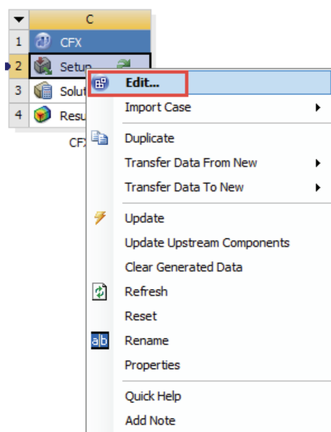


图 17-28 快捷菜单 4

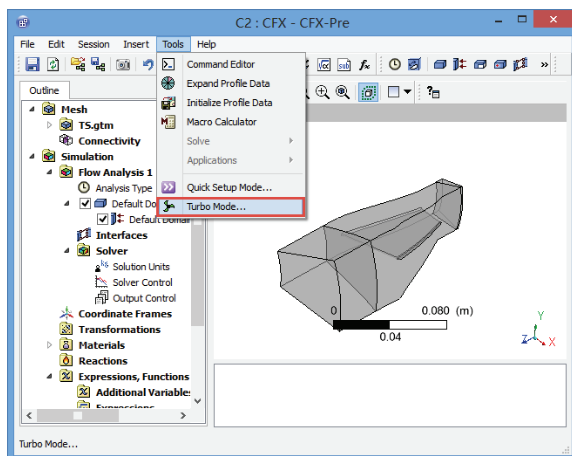


图 17-29 模型

Step3：此时将出现图 17-30 所示的 Basic Settings 设置框，在设置框中的 Machine Type 栏中选择 Fan 选项，其余保持默认即可，并单击 Next 按钮，此时将显示旋转机械的轴线。

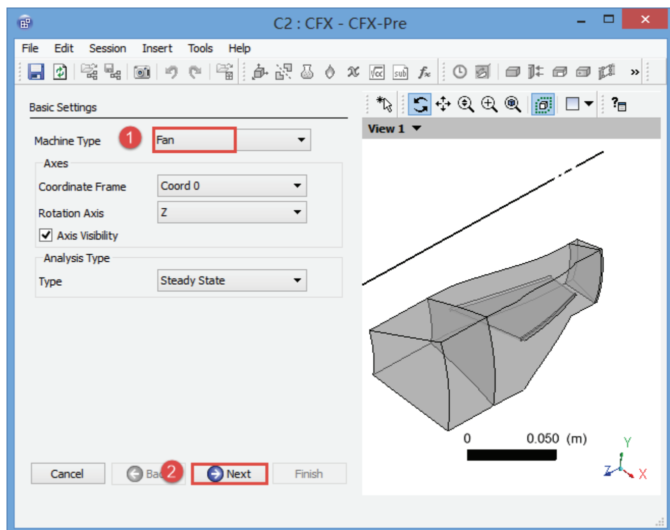


图 17-30 显示轴线

Step4：在图 17-31 所示的 Component Definition 设置框中进行如下操作并单击 Next 按钮。

单击 R1 选项，在下面出现的 Value 栏中输入-2000[rev min^-1]。

勾选 Wall Configuration 选项。

在 Tip Clearance at Shroud 栏中单击 Yes 按钮。

Step5：在图 17-32 所示的 Physics Definition 设置框中进行如下操作并单击 Next 按钮。

在 Fluid 栏中选择 Air at 25C 选项。

在 Inflow/Outflow Boundary Templates 栏中选择 P-Total Inlet Mass Flow Outlet 选项。

在 Inflow 栏中的 P-Total 中输入 0[Pa]。
在 Outflow 栏中的 Mass Flow 中选择 Per Passage 选项。
并在 Mass Flow Rate 栏中输入 0.1[kg s^-1]。

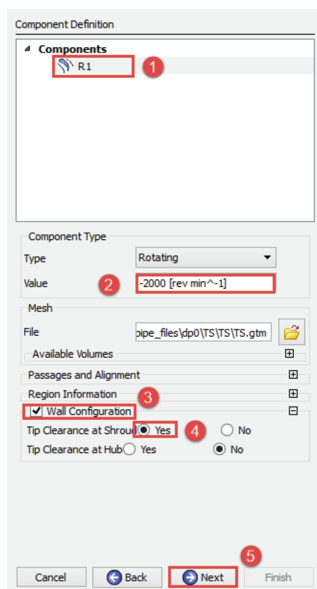


图 17-31　设置参数 1

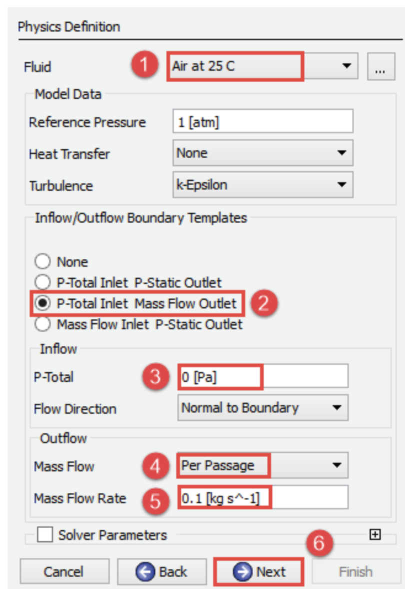


图 17-32　设置参数 2

Step6： 此时出现已经设置好的面连接网格模型，如图 17-33 所示，单击 Next 按钮。
Step7： 在图 17-34 所示的 Final Operation 对话框中单击 Finish 按钮完成设置。

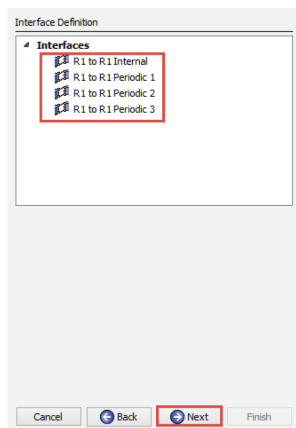


图 17-33　设置参数 3

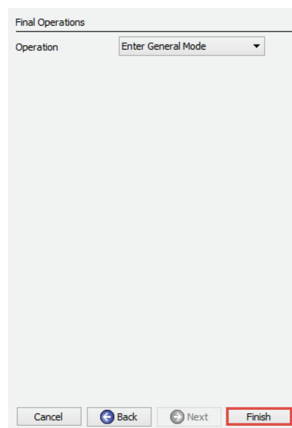


图 17-34　设置参数 4

Step8： 右键单击 Solver Control 选项，在弹出的图 17-35 所示的快捷菜单中选择 Edit 选项，此时启动 Solver Control 选项卡，在选项卡中进行如下设置并单击 OK 按钮。
选择 Basic Settings 选项卡。
在 Max. Iteration 栏中输入 1000。

在 Residual Target 栏中输入 0.00001。

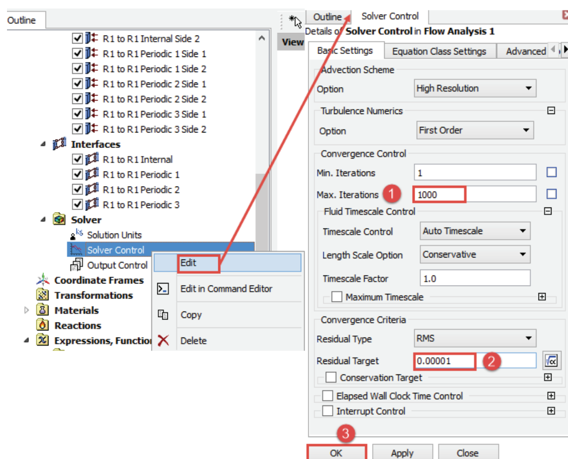


图 17-35 设置参数 5

Step9：右键单击 Output Control 选项，在弹出的图 17-36 所示的快捷菜单中选择 Edit 选项，此时启动 Output Control 选项卡，在选项卡中进行如下设置并单击 OK 按钮。

选择 Monitor 选项卡。

勾选 Monitor Objects 选项。

单击按钮创建一个新控制选项。

在弹出的对话框中输入 Name 为 Pressure point。

在 Output Variables List 栏中选择 Total Pressure in Stn Frame 选项；

在 Cartesian Coordinate 栏中输入 3 个坐标为 0.0845,0.04,0.125，单击 OK 按钮。

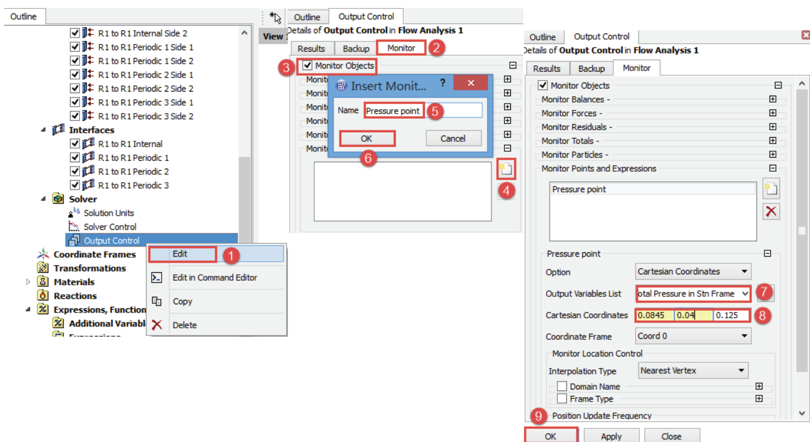


图 17-36 设置参数 6

Step10：依次选择菜单 File→Save Project 和 Close CFX-Pre 关闭 CFX 前处理界面，如图 17-37 所示。

Step11：双击 C3（Solution），此时弹出图 17-38 所示 Define Run 对话框，直接单击 Start Run 按钮进行计算。

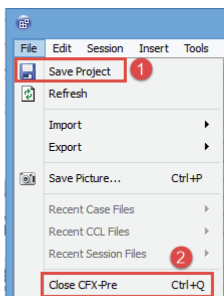


图 17-37 菜单栏

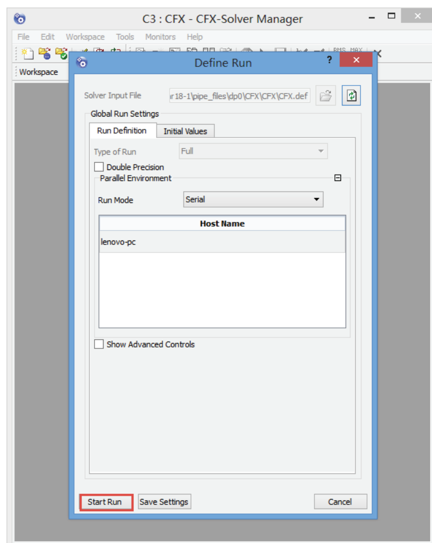


图 17-38 Define Run 对话框

Step12：此时出现 Moment and Mass 收敛曲线图，如图 17-39 所示。

Step13：单击 User Points 选项卡，此时将出现之前定义的压力点收敛曲线图，如图 17-40 所示。

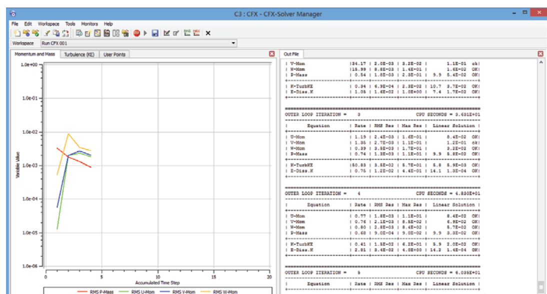


图 17-39 Moment and Mass 收敛曲线

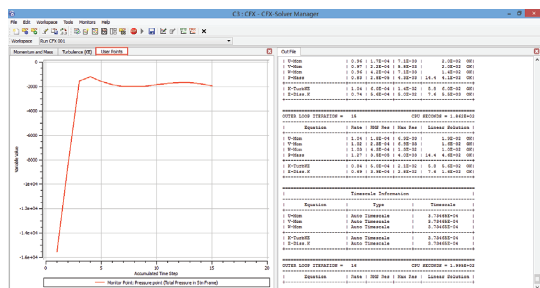


图 17-40 User Points 收敛曲线

Step14：依次选择菜单 File→Close CFX-Solver Manager 关闭 CFX 求解器窗口，如图 17-41 所示。

Step15：右键单击 C4（Results），在弹出的图 17-42 所示的快捷菜单中选择 Edit…选项。

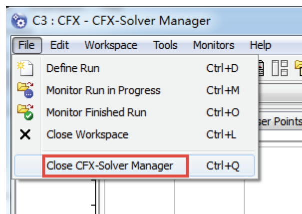


图 17-41 菜单栏选项

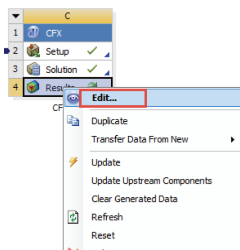


图 17-42 快捷菜单

Step16：此时将出现图 17-43 所示的流体动力学后处理操作平台，在后处理平台中可以完成流场分布、压力的云图及温度分布等的显示。

Step17：单击工具栏中的按钮，在弹出的 Insert Contour 对话框中的 Name 中输入 bladecontour，并单击 OK 按钮，在弹出的 Details of bladecontour 设置窗口中进行如下操作并单击 Apply 按钮，如图 17-44 所示。

在 Range 栏中选择 Local 选项。

在# of Contours 栏中输入 25。

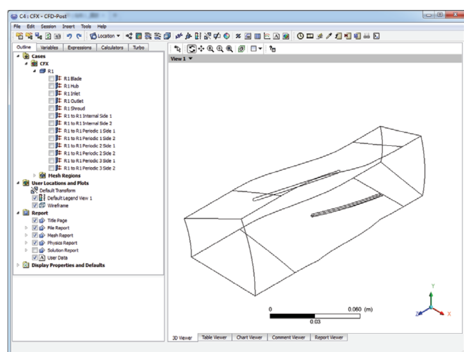
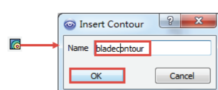


图 17-43 后处理平台



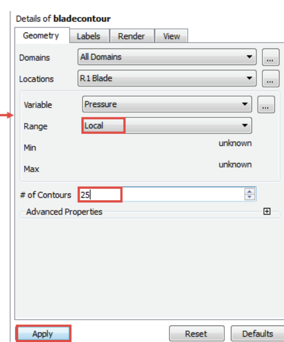


图 17-44 设置参数 1

Step18：此时将出现图 17-45 所示的压力云图。

Step19：单击工具栏中的按钮，在弹出的 Insert Contour 对话框中的 Name 中输入 in and out，并单击 OK 按钮，在弹出的 Details of in and out 设置窗口中进行如下操作并单击 Apply 按钮，如图 17-46 所示。

在 Variable 栏中选择 Total Pressure in Stn Frame 选项。

在 Range 栏中选择 Local 选项。

在# of Contours 栏中输入 25。

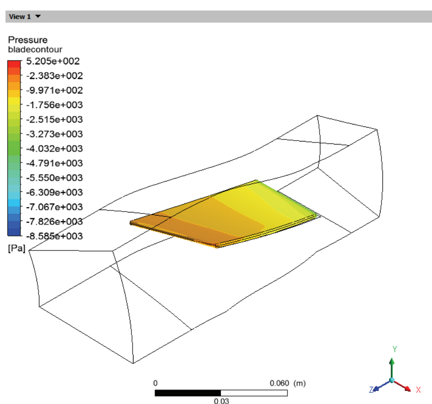
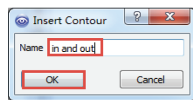


图 17-45 压力云图 1



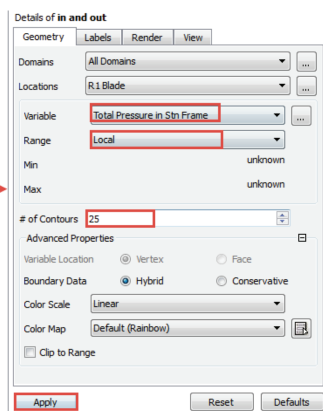


图 17-46 设置参数 2

Step20：此时将出现图 17-47 所示的压力云图。

Step21：单击 Locations 后面的按钮，在弹出的图 17-48 所示 Location Selector 对话框中选中 R1 Inlet 和 R1 Outlet 两个选项并单击 OK 按钮，再单击 Apply 按钮。

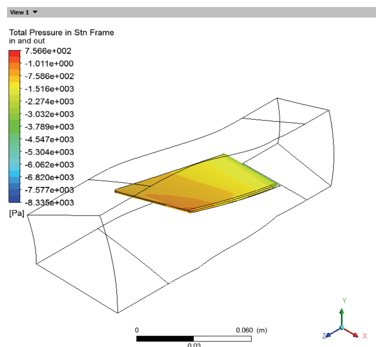


图 17-47　压力云图 2

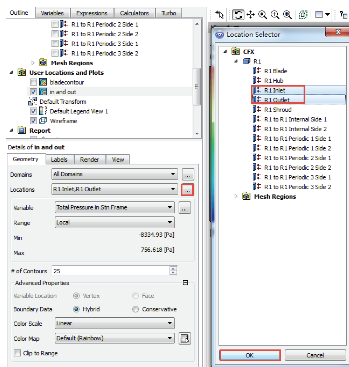


图 17-48　设置参数 3

Step22：此时将出现图 17-49 所示的压力云图。

Step23：单击模型树中的 Turbo 选项卡，并单击图 17-50 所示 Initialize All Components 按钮。

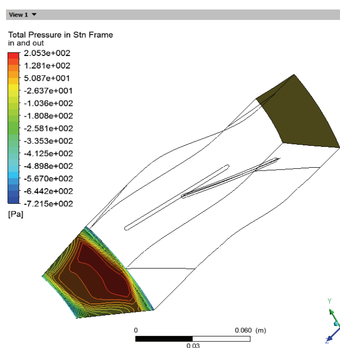


图 17-49　压力云图 3

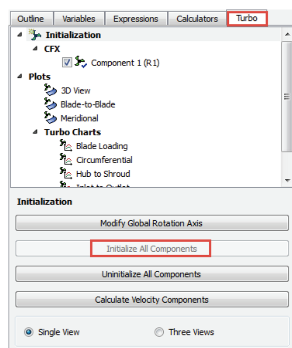


图 17-50　设置参数 4

Step24：右键选择 Blade-to-Blade，在弹出的图 17-51 所示快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step25：此时将出现图 17-52 所示 Details of Blade-to-Blade Plot 设置窗口，在窗口中的 Plot Type 中选择 Contour 选项并单击 Apply 按钮。

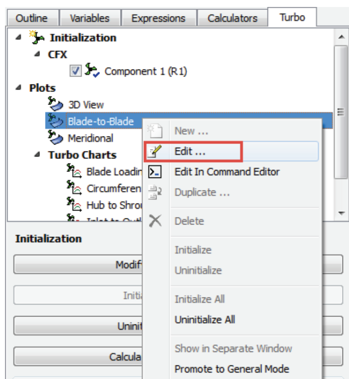


图 17-51　快捷菜单

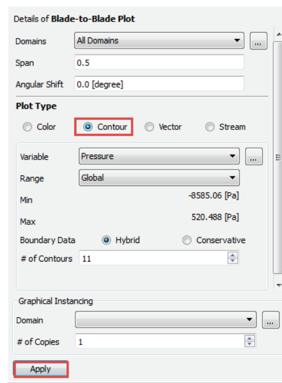


图 17-52　设置参数 5

Step26：此时将出现图 17-53 所示的压力云图。

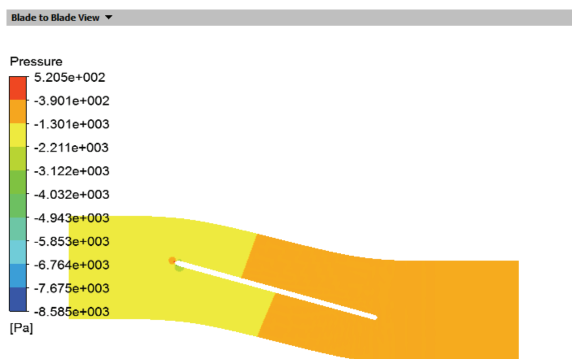


图 17-53 压力云图 4

Step27：将 Span 中的数值改为 0.98，并单击 Apply 按钮，将显示图 17-54 所示压力云图。

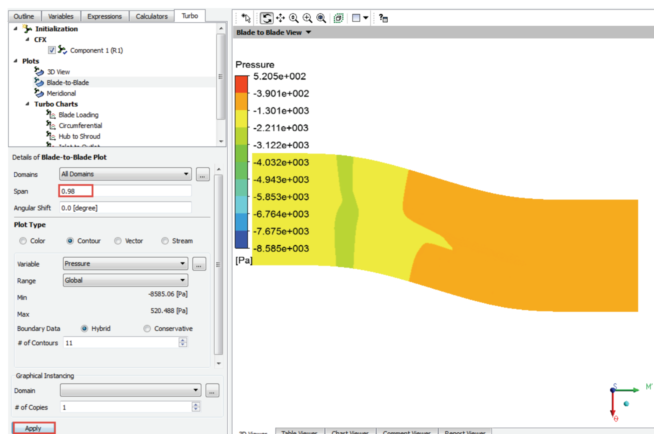


图 17-54 压力云图 5

Step28：将 Plot Type 中的选项改为 Vector，并单击 Apply 按钮，将显示图 17-55 所示的速度矢量云图。

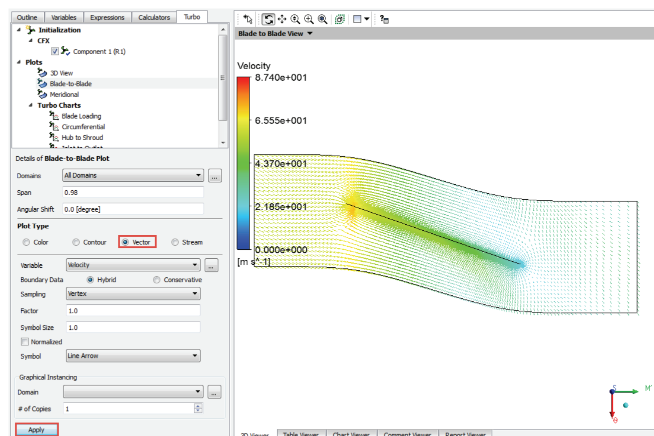


图 17-55 速度矢量云图 1

Step29：右键选择 Meridional，在弹出的图 17-56 所示快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step30：此时将出现图 17-57 所示 Details of Meridional Plot 设置窗口，在窗口中的 Plot Type 中选择 Contour 选项并单击 Apply 按钮，此时将在绘图区域显示压力云图。

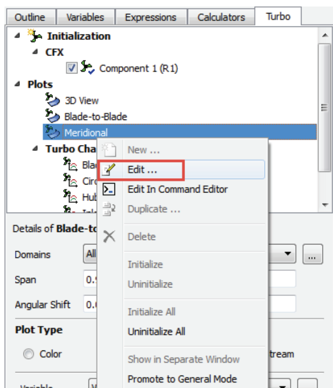


图 17-56　快捷菜单

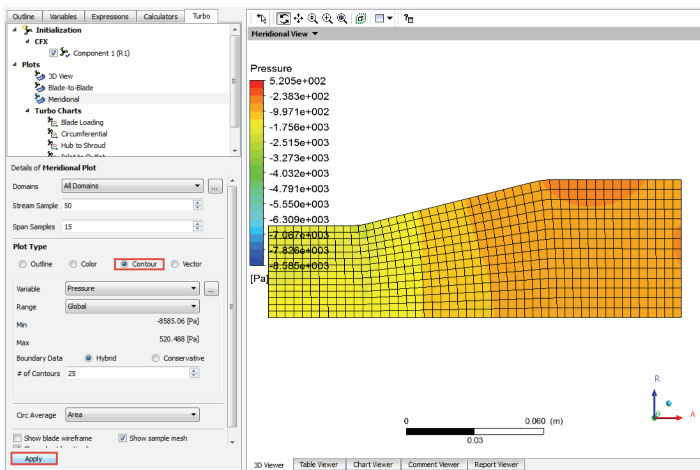


图 17-57　设置参数 6

Step31：将 Plot Type 中的选项改为 Vector，并单击 Apply 按钮，将显示图 17-58 所示速度矢量云图。

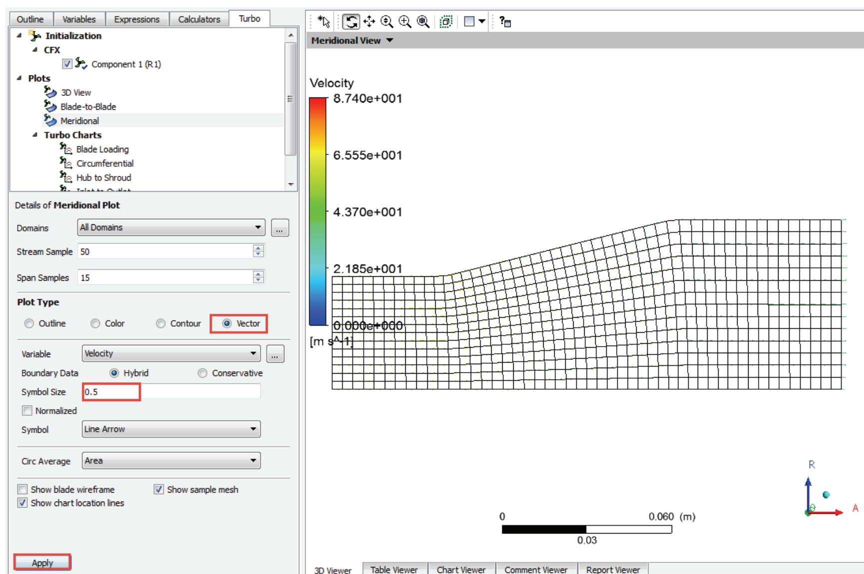


图 17-58　速度矢量云图 2

Step32：右键选择 Blade Loading，在弹出的图 17-59 所示快捷菜单中选择 Edit…选项。

Step33：单击 Blade Loading 选项，此时将出现图 17-60 所示的 Details of Turbo Chart-Blade Loading 设置窗口，直接单击 Apply 按钮，此时将在右侧绘图区域显示出压力变化图表。

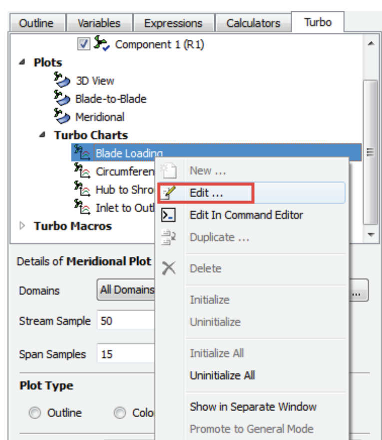


图 17-59　快捷菜单

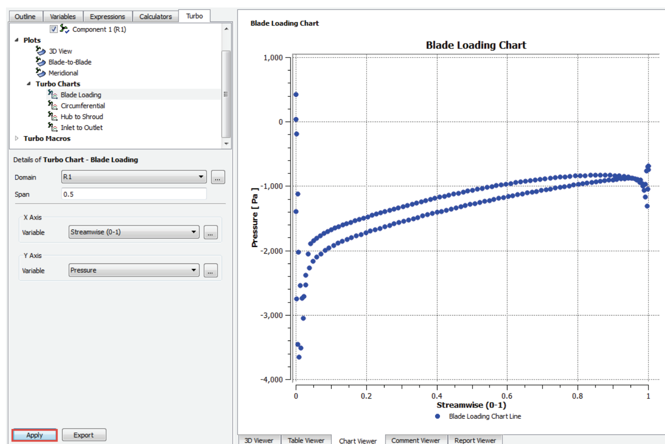


图 17-60　设置

Step34：同样操作选择 Hub to Shroud，将出现如图 17-61 所示图表。

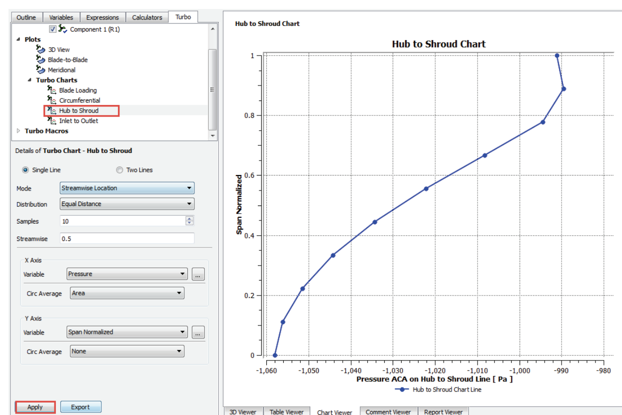


图 17-61　图表 1

Step35：同样操作选择 Inlet and Outlet，将出现图 17-62 所示图表。

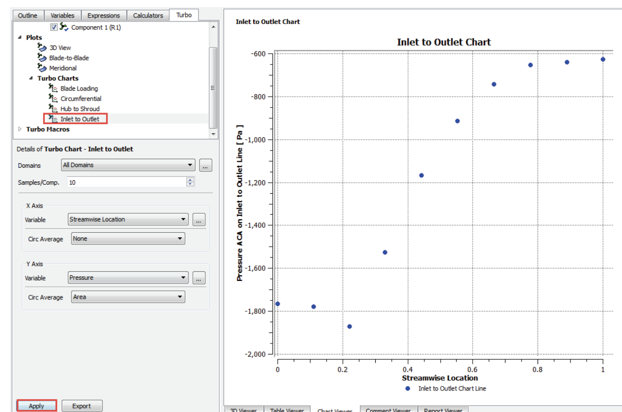


图 17-62　图表 2



Step36： 单击绘图区域下方的“Report Viewer”选项卡，程序将自动创建计算报告，如图 17-63 所示。

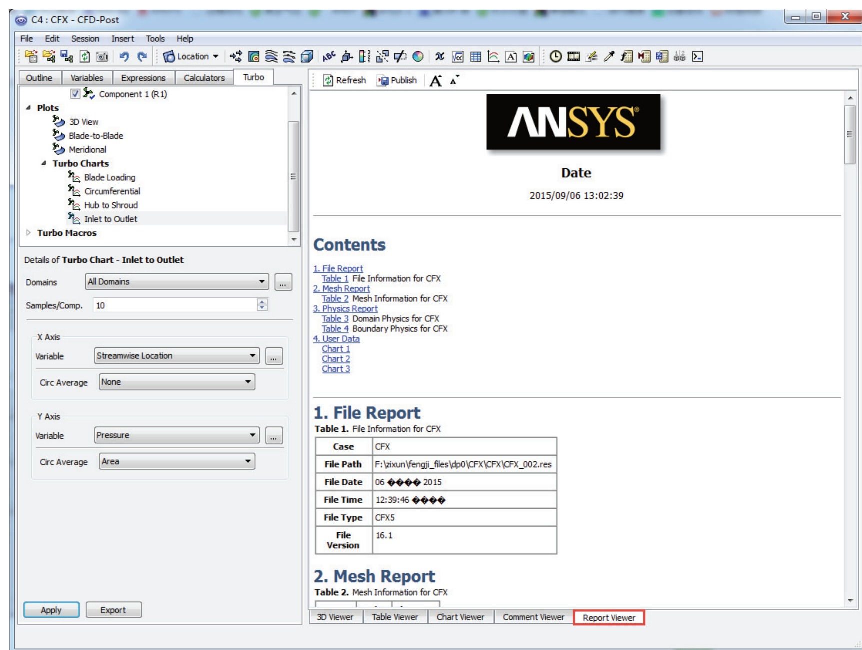


图 17-63　计算报告模板

17.3　本章小结

本章介绍了 ANSYS BladeGen、TurboGrid 及 ANSYS CFX 创建旋转机械模型及流体分析的整个过程，其中包括几何模型的创建、网格剖分、求解器设置、求解计算及后处理等操作方法。

通过本章的学习，读者应该了解一般简单旋转机械模型的建立，网格划分及流体分析的整个过程。



第 18 章　电磁场分析

本章将通过一个简单案例，介绍集成在 ANSYS Workbench 平台中的 Maxwell（麦克斯韦）模块的启动方法及电场计算步骤。

知识点 \ 学习目标	了　解	理　解	应　用	实　践
电场基本知识		√		
麦克斯韦方程组	√			
ANSYS Maxwell 计算过程			√	√

18.1　电磁场基本理论

在电磁学里，电磁场是一种由带电物体产生的一种物理场。处于电磁场的带电物体会感受到电磁场的作用力。电磁场与带电物体（电荷或电流）之间的相互作用可以用麦克斯韦方程和洛伦兹力定律来描述。

电磁场是有内在联系、相互依存的电场和磁场的统一体的总称。随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场，两者互为因果，形成电磁场。

电磁场可由变速运动的带电粒子引起，也可由强弱变化的电流引起，不论原因如何，电磁场总以光速向四周传播，形成电磁波。电磁场是电磁作用的媒介物，具有能量和动量，是物质存在的一种形式。电磁场的性质、特征及其运动变化规律由麦克斯韦方程确定。

18.1.1 麦克斯韦方程

电磁场理论由一套麦克斯韦方程组描述，分析和研究电磁场的出发点就是麦克斯韦方程组的研究，包括这个方面的求解与实验验证。

麦克斯韦方程组实际上由 4 个定律组成，它们分别是安培环路定律、法拉第电磁感应定律，高斯电通定律（简称高斯定律）和高斯磁通定律（亦称磁通连续性定律）。

（1）安培环路定律

无论介质和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 的分布如何，磁场中的磁场强度沿任何一条闭合路径的线积分等于穿过该积分路径所确定的曲面Ω的电流的总和。这里的电流包括传导电流（自由电荷产生）和位移电流（电场变化产生），表示为

$$\oint_{\Gamma}\boldsymbol{H}\mathrm{d}l=\iint_{\Omega}\left(\boldsymbol{J}+\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\right)\mathrm{d}S \tag{18-1}$$

式中，$\boldsymbol{J}$ 为传导电流密度矢量（$\mathrm{A/m^2}$）；$\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}$ 为位移电流密度；D 为电通密度（$\mathrm{C/m^2}$）。

（2）法拉第电磁感应定律

闭合回路中的感应电动势与穿过此回路的磁通量随时间的变化率成正比。用积分表示为

$$\oint_{\Gamma} \boldsymbol{E} \mathrm{d}l = -\iint_{\Omega} \left(\boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \right) \mathrm{d}S \tag{18-2}$$

式中，$\boldsymbol{E}$ 为电场强度（V/m）；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度（T 或 $\mathrm{Wb/m^2}$）。

（3）高斯电通定律

在电场中，不管电解质与电通密度矢量的分布如何，穿出任何一个闭合曲面的电通量等于这已闭合曲面所包围的电荷量，这里指出电通量也就是电通密度矢量对此闭合曲面的积分，积分形式表示为：

$$\oiint_{S} \boldsymbol{D} \mathrm{d}S = \iiint_{v} \boldsymbol{\rho} \mathrm{d}v \tag{18-3}$$

式中，$\boldsymbol{\rho}$ 为电荷体密度（$\mathrm{C/m^3}$）；$\boldsymbol{D}$ 为闭合曲面 S 所围成的体积区域。

（4）高斯磁通定律

磁场中，不论磁介质与磁通密度矢量的分布如何，穿出任何一个闭合曲面的磁通量恒等于零，这里指出磁通量即为磁通量矢量对此闭合曲面的有向积分。用积分形式表示为：

$$\oiint_{S} \boldsymbol{B} \mathrm{d}S = 0 \tag{18-4}$$

式（18-1）～式（18-4）分别有自己的微分形式，也就是微分形式的麦克斯韦方程组，它们分别对应式（18-5）～式（18-8）：

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{18-5}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{18-6}$$

$$\nabla \boldsymbol{D} = \boldsymbol{\rho} \tag{18-7}$$

$$\nabla \boldsymbol{B} = 0 \tag{18-8}$$

18.1.2 一般形式的电磁场微分方程

电磁场计算中，经常对上述这些偏微分进行简化，以便能够用分离变量法、格林函数等解得电磁场的解析解，其解的形式为三角函数的指数形式以及一些用特殊函数（如贝塞尔函数、勒让德多项式等）表示的形式。

但工程实践中，要精确得到问题的解析解，除了极个别情况，通常是很困难的。于是只能根据具体情况给定的边界条件和初始条件，用数值解法求其数值解，有限元法就是其中最为有效、应用最广的一种数值计算方法。

（1）矢量磁势和标量电势

对于电磁场的计算，为了使问题得到简化，通过定义两个量来把电场和磁场变量分离开来，分别形成一个独立的电场和磁场的偏微分方程，这样便有利于数值求解。这两个量一个是矢量磁势 $\boldsymbol{A}$（亦称磁矢位），另一个是标量电势 ϕ，它们的定义如下。

矢量磁势定义为：

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{18-9}$$

也就是说磁势的旋度等于磁通量的密度。而标量电势可定义为：

$$E = -\nabla \phi \tag{18-10}$$

（2）电磁场偏微分方程

按式（18-9）和式（18-10）定义的矢量磁势和标量电势能自动满足法拉第电磁感应定律和高斯磁通定律。然后再应用到安培环路定律和高斯电通定律中，经过推导，分别得到了磁场偏微分方程（18-11）和电场偏微分方程（18-12）：

$$\nabla^2 A - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \tag{18-11}$$

$$\nabla^2 \phi - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{18-12}$$

μ 和 ε 分别为介质的磁导率和介电常数，∇^2 为拉普拉斯算子：

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \tag{18-13}$$

很显然式（18-11）和式（18-12）具有相同的形式，是彼此对称的，这意味着求解它们的方法相同。至此，还可以对式（18-11）和式（18-12）进行数值求解，如采用有限元法，解得磁势和电势的场分布值，然后再经过转化（即后处理）可得到电磁场的各种物理量，如磁感应强度、储能。

18.1.3 电磁场中常见边界条件

电磁场问题实际求解过程中，有各种各样的边界条件，但归结起来可概括为 3 种：狄利克雷（Dirichlet）边界条件、诺依曼（Neumann）边界条件及它们的组合。

狄利克雷边界条件表示为：

$$\phi|_\Gamma = g(\Gamma) \tag{18-14}$$

式中，Γ 为狄利克雷边界；$g(\Gamma)$ 是位置的函数，可以为常数和零，当为零时称此狄利克雷边界为奇次边界条件，如平行板电容器的一个极板电势可假定为零，而另外一个假定为常数，为零的边界条件即为奇次边界条件。

诺依曼边界条件可表示为：

$$\frac{\delta \phi}{\delta n}|_\Gamma + f(\Gamma)\phi|_\Gamma = h(\Gamma) \tag{18-15}$$

式中，Γ 为诺依曼边界；n 为边界 Γ 的外法线矢量；$f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数（可为常数和零），当为零时为奇次诺依曼条件。

实际上电磁场微分方程的求解中，只有在边界条件和初始条件的限制时，电磁场才有确定解。鉴于此，通常称求解此类问题为边值问题和初值问题。

18.1.4 ANSYS Workbench 平台电磁分析

ANSYS Workbench 除了应用原有的 Emag 模块进行电磁场分析外，将 Workbench 平台

中的绝大部分电磁场分析功能交给了 Ansoft 系列软件来完成。

Ansoft 系列软件可以分析计算以下设备中的电磁场：电力发电机、磁带及磁盘驱动器、变压器、波导、螺线管传动器、谐振腔、电动机、连接器、磁成像系统、天线辐射、图像显示设备传感器、滤波器和回旋加速器等。

一般在电磁场分析中关系的典型物理量为：磁通密度、能量损耗、磁场强度、漏磁、磁力及磁矩、s-参数、阻抗、品质因数 Q、电感、回波损耗、涡流和本征频率等。

18.1.5 Ansoft 软件电磁分析

Ansoft 系列软件包括以下几个分析软件：分析低频电磁场的 Maxwell 软件、分析高频电磁场的 HFSS 软件及多域机电系统设计与仿真分析软件 Simplorer，除此之外还有 Designer、Nexxim、Q3D Extractor、SIwave 及 TPA 等用于各种分析和提取不同计算结果的软件。

在电机、变压器等电力设备行业常用的软件为 Maxwell，下面以低频电磁分析软件 Maxwell 软件作简要介绍：

1．Maxwell 软件的边界条件

Maxwell 软件求解电磁场问题时的边界条件除了有上面一节介绍的狄利克雷边界条件和诺依曼边界条件外，还详细分为以下几种边界条件。

- 自然边界条件：自然边界条件是软件系统的默认边界条件，不需要用户指定，是不同媒质交界面场量的切向和法向边界条件。
- 对称边界条件：对称边界条件包括奇对称和偶对称两大类。奇对称边界可以模拟一个设备的对称面，在对称面的两侧电荷、电位及电流等满足大小相等、符号相反；偶对称边界可以模拟一个设备的对称面，在对称面的两侧电荷、电位及电流等满足大小相等、符号相同的条件。采用对称边界条件可以减小模型的尺寸，有效地节省计算资源。
- 匹配边界条件：匹配边界条件是模拟周期性结构的对称面，使主边界和从边界场量具有相同的幅度（对于时谐量还有相位），相同或相反的方向。
- 气球边界条件：气球边界条件是 Maxwell 2D 求解器常见的边界条件，常常指定在求解域的边界处，用于模拟绝缘系统等。

2．Maxwell 2D/3D 电磁场求解器分类

（1）Maxwell 2D 电磁分析模块分类

1）静态电场求解器

静态电场求解器用于分析由直流电压源、永久极化材料、高压绝缘体中的电荷/电荷密度、套管、断路器及其他静态泄放装置所引起的静电场。材料类型包括各种绝缘体（各向异性及特性随位置变化的材料）及理想导体。该模块能自动计算力、转矩、电容及储能等参数。

2）恒定电场求解器

假定电机只在模型截面中流动，它用于分析直流电压分布，计算损耗介质中流动的电流、电纳和储能。如印制电路板中电流在绝缘基板上非常薄的轨迹中流动，由于轨迹非常细，其厚度可以忽略，因此该电流可以用于一个俯视投影来建模。用户可以得到电流的分布，又可获得轨迹上电阻值。

3）交变电场求解器

除了电介质及正弦电压源的传导损耗外，该求解器与静电场求解器类似，通过计算系统的电容与电导，计算出绝缘介质的损耗。

4）瞬态求解器

瞬态求解器用于求解某些涉及运动和任意波形的电压、电流源激励的设备（如电动机、无摩擦轴承、涡流断路器），获得精确的预测性能特性。该模块能同时求解磁场、电路及运动等强耦合的方程，因而可轻而易举地解决上述装置的性能分析问题。

（2）Maxwell 3D 电磁分析模块分类

三维静电场：三维静电场可用于计算由静态电荷分布和电压引起的静电问题。利用直接求取的电标量位，仿真器可自动计算出静电场及电通量密度。用户可根据这些基本的场量求取力、转矩、能量及电容值。在分析高压绝缘体、套管及静电设备中的电荷密度产生的电场时，静电场功能尤为适用。

18.2 瞬态磁场分析实例——金属屏蔽分析

本节将介绍利用 Maxwell 2D 模块计算一个通有交变电流的绕组磁场分析，将采用瞬态分析方法进行分析。

学习目标：熟练掌握 Maxwell 瞬态磁场分析激励设置；熟练掌握 Maxwell 2D 分析的应用范围；熟练掌握 Maxwell2D 分析边界条件的处理。

模型文件	无
结果文件	网盘\ Chapter18\char18-1\Project50Hz.wbpj

18.2.1 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击 Workbench 平台左侧的 Toolbox→Analysis Systems 中的 Maxwell 2D（Maxwell 2D 电磁场分析模块），此时在 Project Schematic 窗口中出现图 18-1 所示的电磁场分析流程图表。

Step3：双击表 A 中的 A2 进入 Maxwell 软件界面，如图 18-2 所示。在 Maxwell 软件中可以完成几何建模于有限元分析的流程操作。

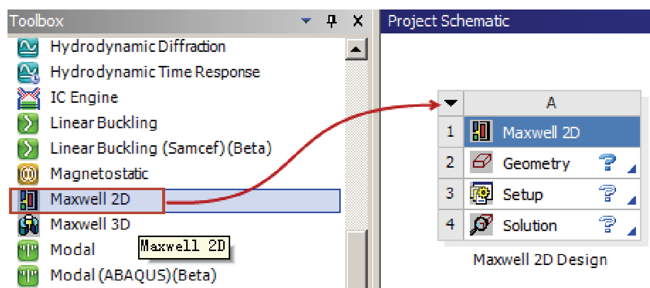


图 18-1　电磁场分析流程图表

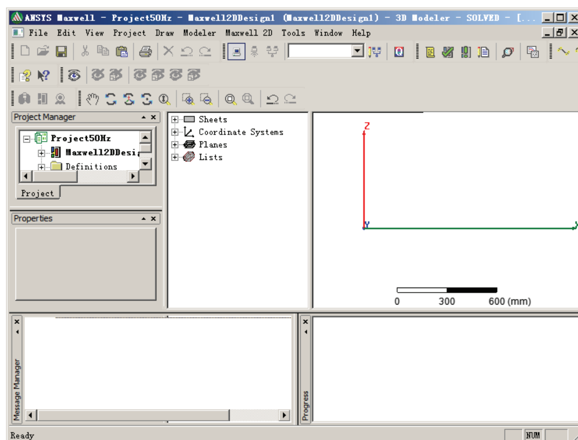


图 18-2　Maxwell 软件界面

18.2.2　建立求解器

选择菜单中的 Maxwell 2D→Solution Type 选项，在弹出的图 18-3 所示的设置，求解域对话框中进行如下设置。

在 Geometry Mode 栏中选择 Cylinder about Z 选项。

在 Magnetic 栏中选择 Transient（瞬态分析），并单击 OK 按钮。

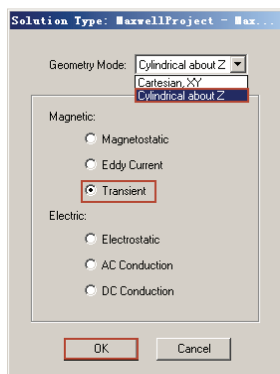


图 18-3　设置求解域

18.2.3　建立几何模型

Step1：单击工具栏中的按钮，创建长方形，在右下角弹出的坐标输入对话框进行如下输入。

X=500；Y=0；Z=0，然后按〈Enter〉键，确定第一点坐标，如图 18-4 所示。



图 18-4　创建第一点

Step2：在坐标输入框中输入如下坐标值。

dX=18；dY=0；dZ=500，按〈Enter〉键，如图 18-5 所示。



图 18-5 创建第二点

Step3：此时弹出图 18-6 所示的 Properties：MaxwellProject 对话框，在对话框中可以对几何尺寸及坐标进行修改，此案例保持默认即可，单击“确定”按钮。

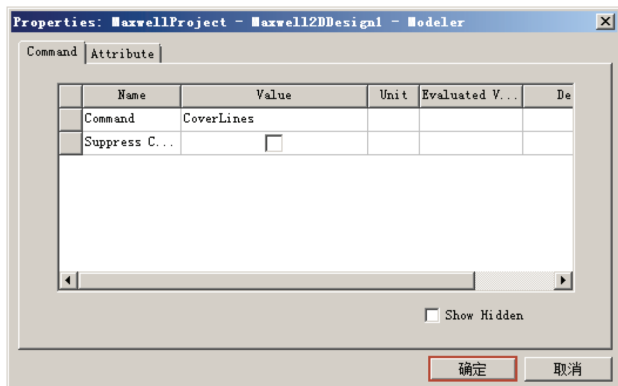


图 18-6 Properties：MaxwellProject 对话框

Step4：单击工具栏中的按钮，将几何实体全部显示在窗口中。

Step5：复制几何实体。选择刚刚建立的几何实体，此时实体处于加亮状态，选择菜单中的 Edit→Duplicate Along Line 命令，或者单击工具栏中的按钮，单击坐标原点或者在右下角的坐标输入窗口中输入 3 个坐标都为 0，按〈Enter〉键，完成原点输入，在 dX 栏中输入 50，dY 栏中输入 0；dZ 栏中输入 0，按〈Enter〉键，在弹出的图 18-7 所示的 Duplicate along line 对话框中的 Total number 栏中输入 3，单击 OK 按钮。

Step6：移动几何实体。选中 3 个几何实体，单击工具栏中的命令，在弹出的移动设置对话框中输入（0 ,0 ,-250），按〈Enter〉键。

Step7：创建几何模型。在坐标为（0 ,0 ,400）创建宽度方向为 740mm，高度方向为 40mm 的矩形，如图 18-8 所示。

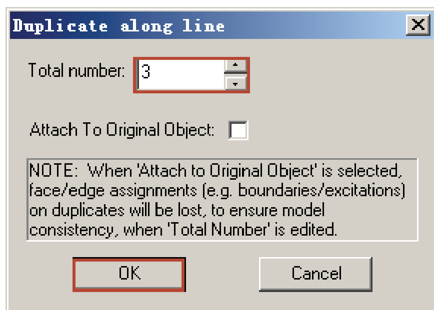


图 18-7 几何模型复制

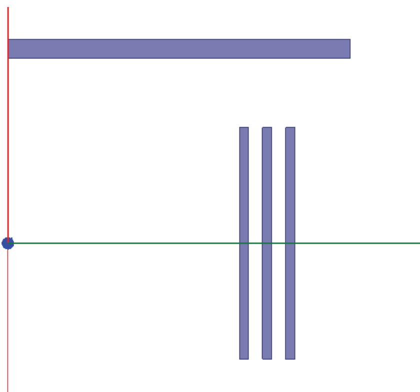


图 18-8 几何模型

Step8： 建立求解域。单击工具栏中的按钮，在弹出的图 18-9 所示的对话框中输入 500，单击 OK 按钮，如图 18-10 所示。

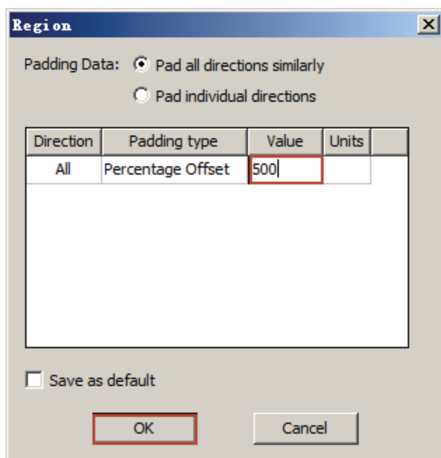


图 18-9　求解域设置

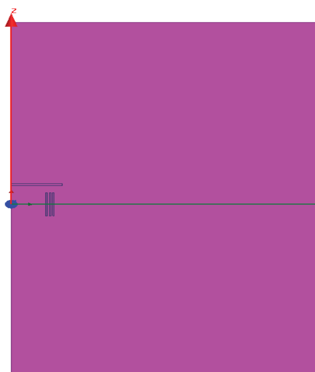


图 18-10　求解几何模型

18.2.4 添加材料

Step1： 选择 3 个几何，使其处于加亮状态，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Assign Material…命令，如图 18-11 所示。

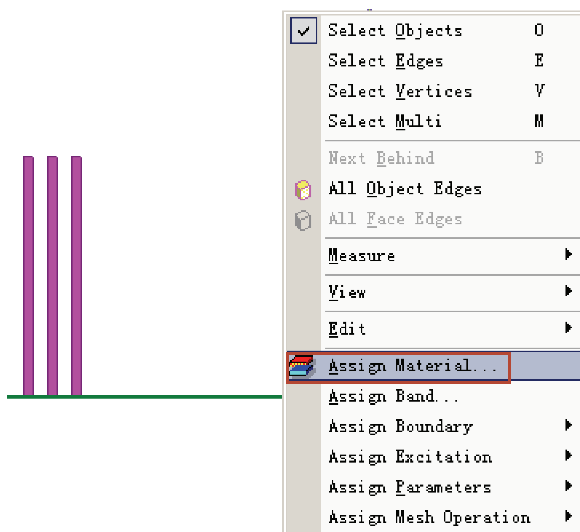


图 18-11　设置材料

Step2： 在弹出的 Select Definition 对话框中选择 aluminum 材料，并单击“确定”按钮，如图 18-12 所示。

Step3： 求解域默认即可。

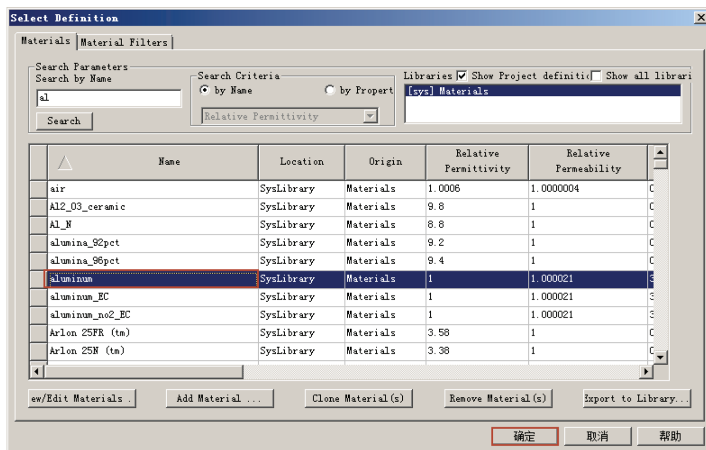


图 18-12　选择材料

18.2.5 边界条件设定

Step1：几何窗口中选择 Rectangle1 选项，使其处于加亮状态，右键依次选择 Assign Excitation→Coil 命令，如图 18-13 所示。

Step2：在弹出的图 18-14 所示的 Coil Excitation 对话框中进行如下设置。

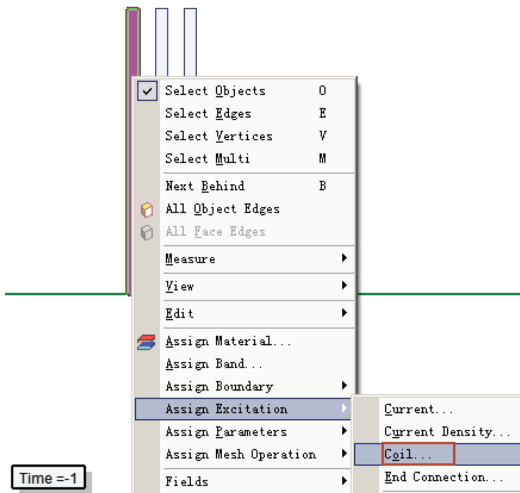


图 18-13　添加激励图 1

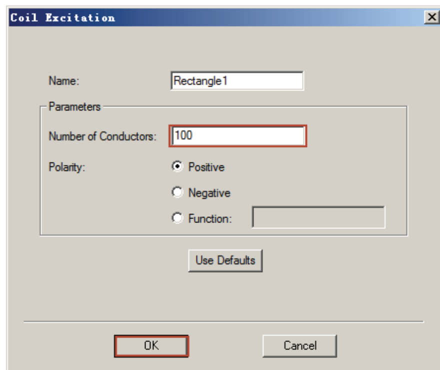


图 18-14　添加激励 1

在 Number of Conductor 栏中输入 100，表示线圈有 100 匝绕组，单击 OK 按钮。

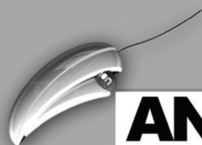
Step3：几何窗口中选择 Rectangle1 选项，使其处于加亮状态，右键依次选择 Assign Excitation→Add Winding 命令，如图 18-15 所示。

Step4：在弹出的图 18-16 所示的 Winding 对话框中进行如下设置。

在 Type 栏中选择 Current 选项，表示激励为电流激励。

选择 Strand 选项，表示不计算绕组涡流。

在 Current 栏中输入函数 50*sin(2*pi*50*time)，单击“确定”按钮。



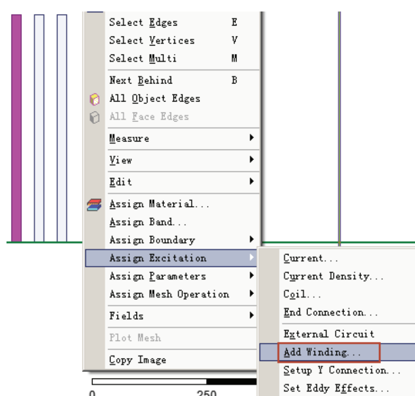


图 18-15　添加激励图 2

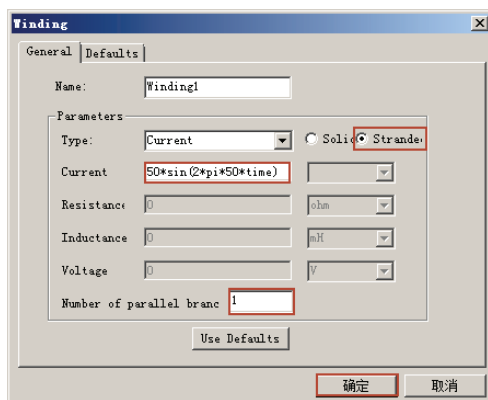


图 18-16　添加激励 2

Step5： 右键选择 Project Manager 窗口下面的 Winding1 选项，在弹出的图 18-17 所示的快捷菜单中选择 Add Coils 命令。

Step6： 选中 Rectangular1 行，并单击 OK 按钮，完成绕组的激励添加，如图 18-18 所示。

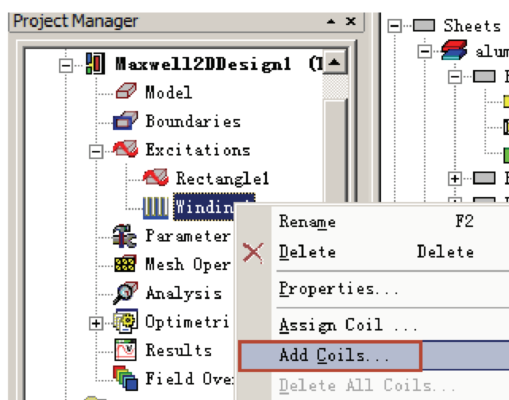


图 18-17　添加线圈属性

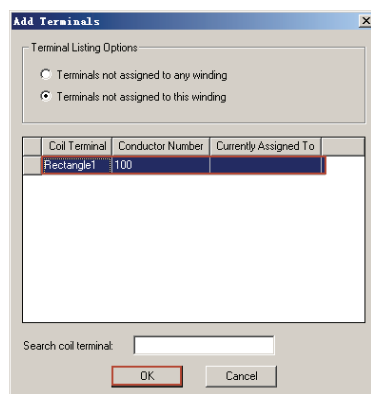


图 18-18　赋予属性

Step7： 同样操作，赋予其余两个绕组电流，完成后如图 18-19 所示。

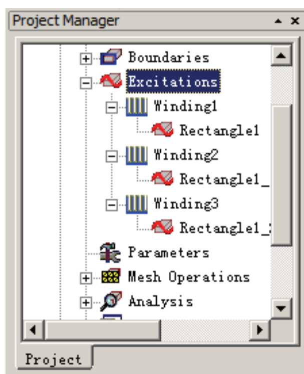


图 18-19　赋予绕组电流

Rectangular2 的线圈匝数为 90，电流为 54*sin(2*pi*50*time)。

Rectangular3 的线圈匝数为 80，电流为 58*sin(2*pi*50*time)。

Step8： 设置边界条件，选择求解域的 3 个边界（除了 Z 轴上的线外）依次选择菜单 Maxwell 2D→Boundaries→Assign→Balloon，完成对求解域边界的设置。

18.2.6 网格划分

Step1： 选择 3 个几何（不选择求解域），使其处于加亮状态，右键依次选择 Assign Mesh→Operation→Inside Selection→Length Based 命令，如图 18-20 所示。

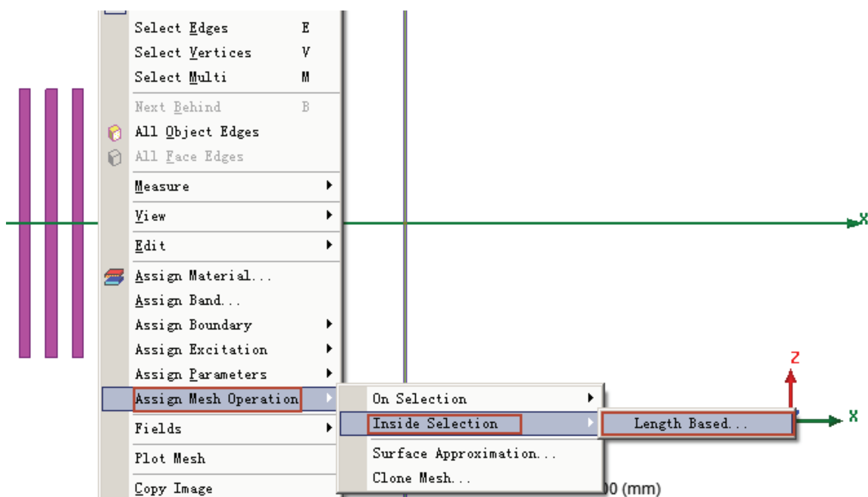


图 18-20 网格设置

Step2： 在弹出的图 18-21 所示的对话框中进行如下设置。

在 Maximum Length of Element 栏中输入 10mm，单击 OK 按钮。

Step3： 同样操作设置求解域的网格大小为 100mm，如图 18-22 所示。

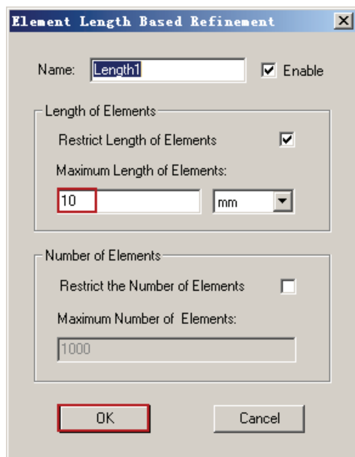


图 18-21 网格大小设置 1

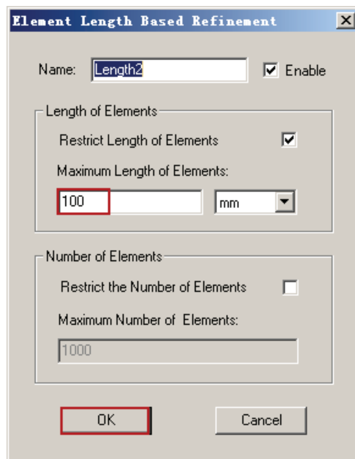
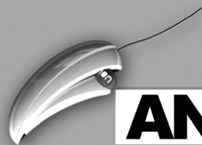


图 18-22 网格大小设置 2



18.2.7 求解计算

Step1：依次选择菜单 Maxwell 3D→Analysis Setup→Add Solution Setup 命令，在弹出的图 18-23 所示的对话框中进行如下设置。

在“General”选项卡中的 Stop time 栏中输入 0.2s。

在“Time step”栏中输入 0.002s。

切换到“Save Fields”选项卡中，设置 Start 为 0s。

设置“Stop”为 0.2s；设置“Step”为 0.002s。

单击 Add to List 按钮，其余默认即可，单击“确定”按钮，如图 18-24 所示。

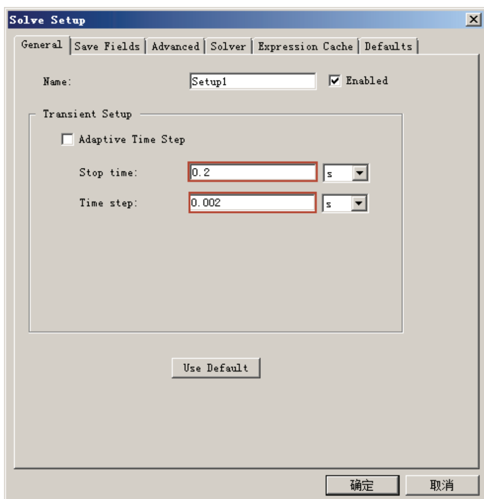


图 18-23　求解器时间设置

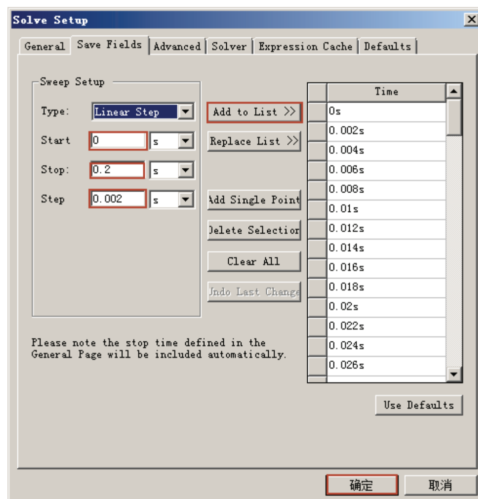


图 18-24　结果保存设置

Step2：保存文件。单击工具栏中的按钮保存工程文件名为 Project50Hz。

Step3：模型检测。模型检测为了检查几何模型的建立，边界条件的设置是否有问题。依次选择菜单 Maxwell3D→Validation Check 命令，此时弹出图 18-25 所示的对话框，如果全部项目都有✓说明此前处理操作没有问题；如果有✗弹出则重新检查模型；如果有！出现不会影响计算。

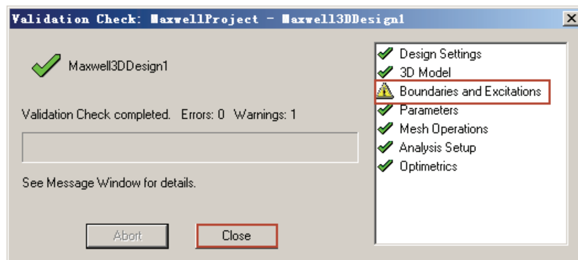


图 18-25　检测模型

Step4：网格划分。依次选择 Maxwell 3D→Apply Mesh Operation 命令，此时开始划分网格。

注意：由于网格数量较大，划分需要一段时间，具体时间长短根据计算机配置有所不同，读者此处可以将网格划分粗糙一点。

Step5：显示网格。选中所有几何，依次选择菜单 Maxwell 2D→Fields→Plot Mesh 命令，在弹出的对话框中单击 Done 按钮，经过一段时间的计算，网格如图 18-26 所示。

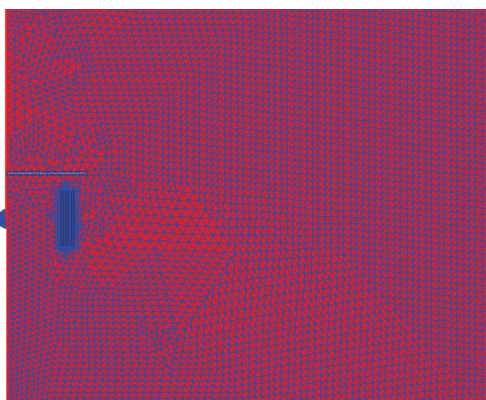


图 18-26　模型局部网格

Step6：在工具栏中单击按钮，在弹出的图 18-27 所示的对话框中可以查看网格数量等一些信息。

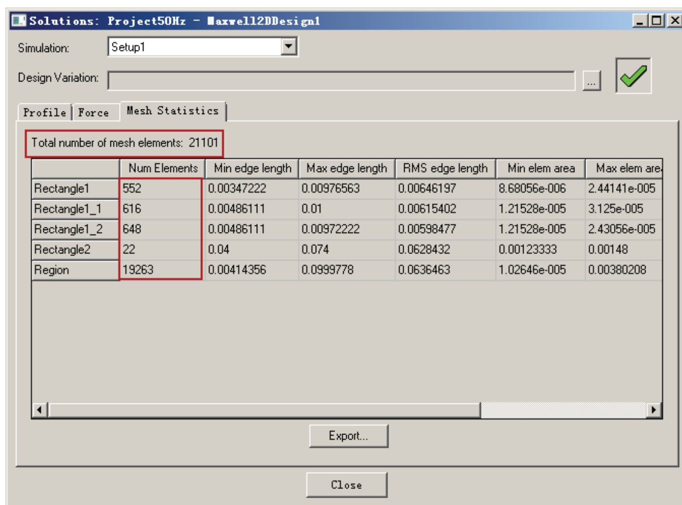


图 18-27　查看网格数量

Step7：计算。依次选择 Maxwell 3D→Analyze All 命令，此时程序开始计算。

Step8：双击左下角的 Time= -1，此时弹出图 18-28 所示的对话框，在对话框中任意选择一个时间节点，单击“确定”按钮。

Step9：选中所有几何，依次选择菜单 Maxwell 2D→Fields→Fields→A→Flux Line 命令，此时磁力线如图 18-29 所示。

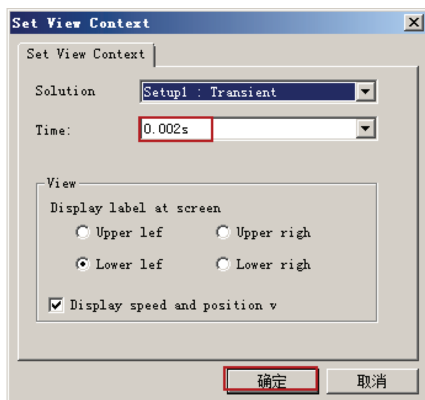


图 18-28　选择节点

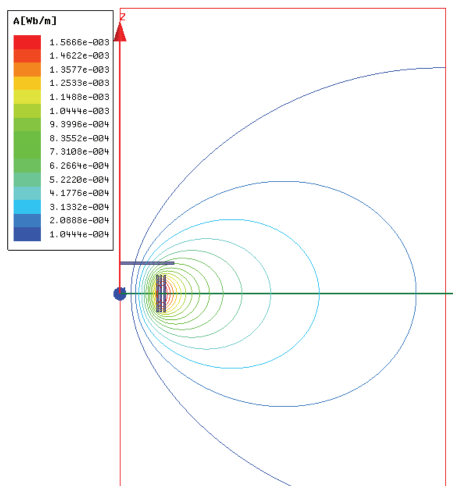


图 18-29　磁力线图

Step10：同样的方法可以查看图 18-30 所示的某一时刻的磁矢量图和图 18-31 所示的磁场分布云图。

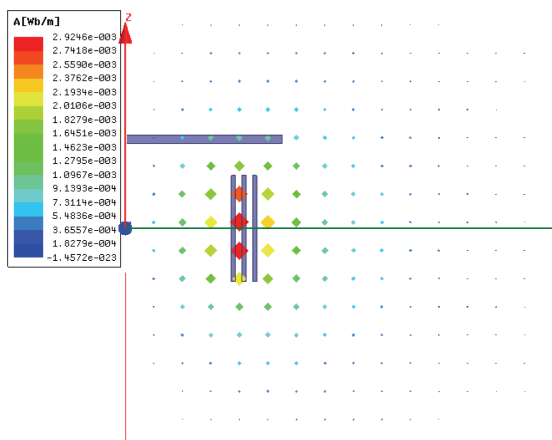


图 18-30　磁矢量图

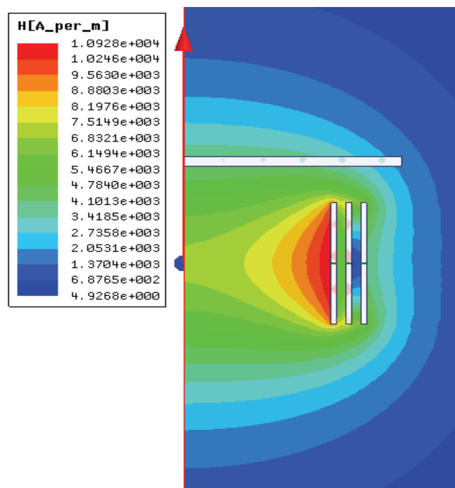


图 18-31　磁场分布云图

18.2.8 图表显示

Step1：依次选择菜单 Maxwell 3D→Results→Create Transient Report→Rectangular Report 命令，在弹出图 18-32 所示的对话框中进行如下操作。

在 Category 栏中选择 Winding 选项。

按住〈Ctrl〉键，在 Quantity 栏中选择 InputCurrent(Winding1)，InputCurrent(Winding2)，InputCurrent(Winding3)选项。

单击 New Report 按钮。

Step2：此时出现图 18-33 所示 3 个电流随时间变化的曲线图。

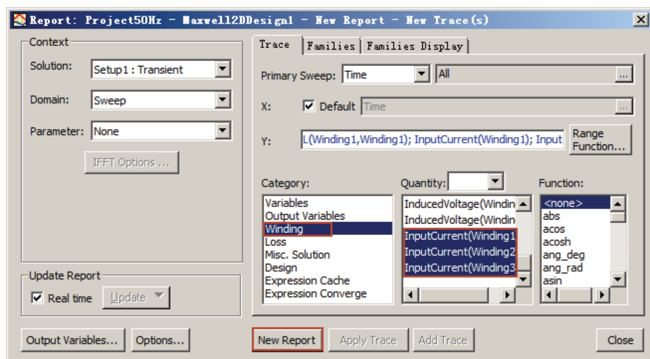


图 18-32　图表设置 1

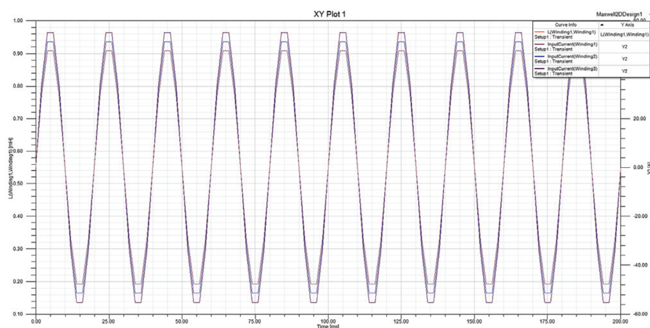


图 18-33　电流曲线图

18.2.9 3D 图表显示

Step1：依次选择菜单 Maxwell 3D→Results→Create Transient Report→3D Rectangular Report 命令，在弹出的图 18-34 所示的对话框中进行如下操作。

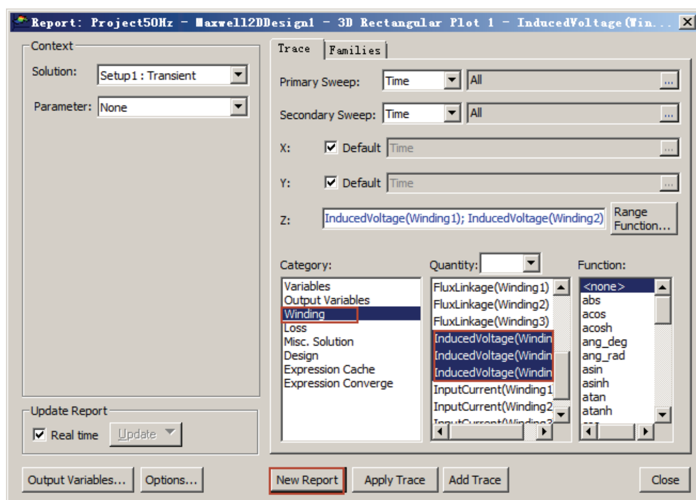
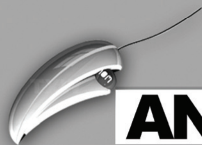


图 18-34　图表设置 2



在 Category 栏中选择 Winding 选项。

同样操作，按住〈Ctrl〉键，然后在 Quantity 栏中选择 InducedVoltage(Winding1)，InducedVoltage(Winding2)，InducedVoltage(Winding3)选项。

单击 New Report 按钮。

Step2： 此时出现图 18-35 所示 3 个电压随时间变化的曲线图。

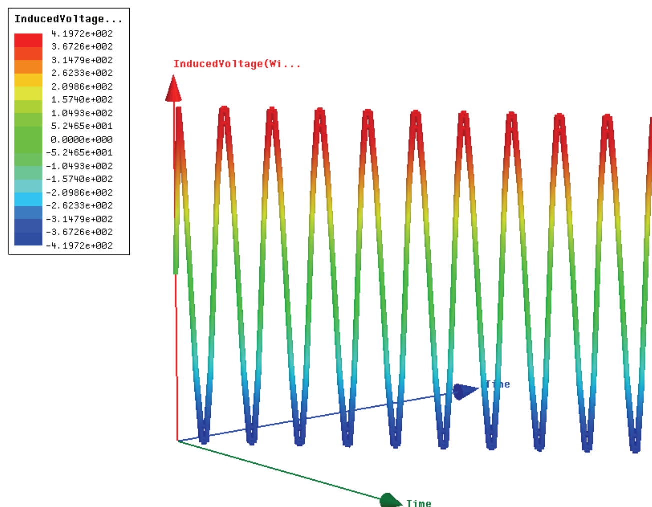


图 18-35　电压曲线图

Step3： 依次选择菜单 Maxwell 3D→Results→Create Transient Report→Rectangular Stacked Report 命令，在弹出的对话框选择步骤 1 的 3 个电流，单击 New Report 按钮，此时显示图 18-36 所示的电流图表。

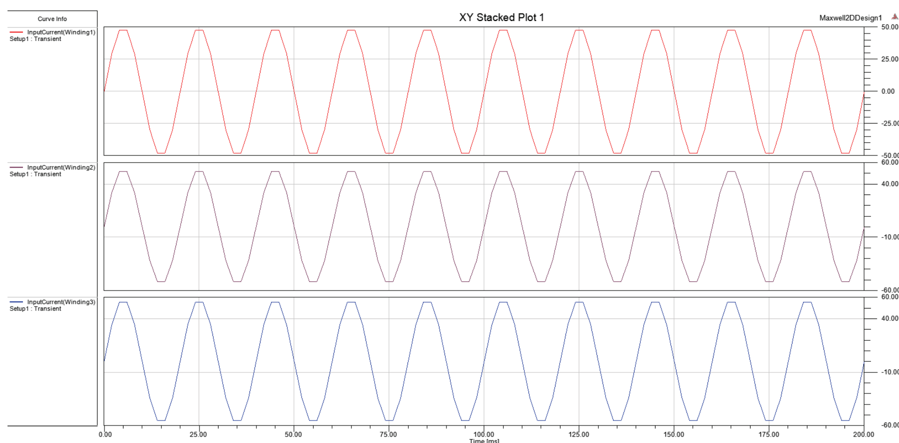


图 18-36　电流曲线图

18.2.10 修改材料属性

Step1： 如图 18-37 所示，复制一个新项目。

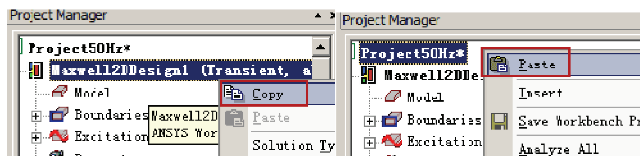


图 18-37　复制项目

Step2： 将 Rectangle2 几何赋材料为 NdFe30。

Step3： 进行计算。

Step4： 选中所有几何，依次选择菜单 Maxwell 2D→Fields→Fields→A→Flux Line 命令，此时磁力线如图 18-38 所示。

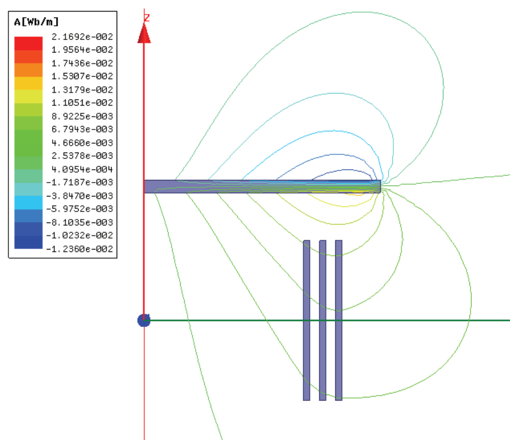


图 18-38　磁力线图

Step5： 同样的方法可以查看图 18-39 所示的某一时刻的磁矢量图和图 18-40 所示的磁场分布云图。

对比以上可以看出 NdFe30 材料具有改变磁场分布的效果。

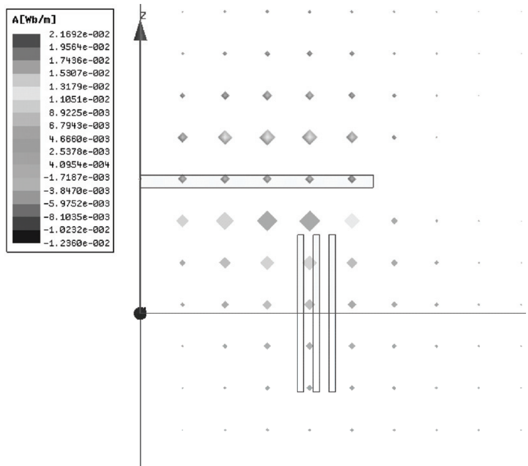


图 18-39　磁矢量图

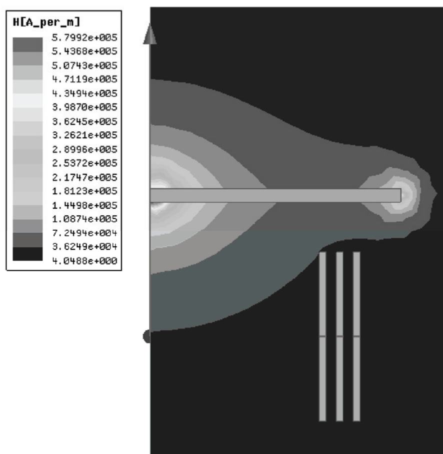


图 18-40　磁场分布云图

18.2.11 保存与退出

Step1：单击 Maxwell 界面右上角的✕（关闭）按钮，退出 Maxwell 返回到 Workbench 主界面。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，在弹出来的“另存为”对话框中输入文件名为 Project50Hz。

Step3：单击右上角的✕（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

18.3 本章小结

本章通过简单的实例，介绍了集成在 ANSYS Workbench 平台中的 Maxwell 模块的电磁分析模块的基本方法及操作步骤，由于篇幅限制，并未对每种类型的分析进行展开介绍，希望读者通过以上两个案例对电磁场分析有一定的理解。



第 5 篇

第 19 章　结构优化分析

本章将对 ANSYS Workbench 软件的优化分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对优化分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定，后处理操作。

学习目标 / 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
优化分析知识		√		
优化分析应用		√		
ANSYS Workbench 优化分析			√	√

19.1　优化分析简介

结构优化是从众多方案中选择最佳方案的技术。一般而言，设计主要有两种形式，即功能设计和优化设计。功能设计强调的是该设计能达到预定的设计要求，但仍能在某些方面进行改进。优化设计是一种寻找确定最优化方案的技术。

19.1.1　优化设计概述

所谓“优化”是指“最大化”或者“最小化”，而“优化设计”指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且需要的支出最小。

优化设计有两种分析方法：解析法——通过求解微分与极值，进而求出最小值；数值法——借助于计算机和有限元，通过反复迭代逼近，求解出最小值。由于解析法需要列方程，求解微分方程，对于复杂的问题列方程和求解微分方程都是比较困难的，所以解析法常用于理论研究，工程上很少使用。

随着计算机技术的发展，结构优化算法也取得了更大的发展，根据设计变量的类型不同，已由较低层次的尺寸优化，到较高层次的结构形状优化，现已到达更高层次——拓扑优化。优化算法也由简单的准则法，到数学规划法，进而到遗传算法等。

传统的结构优化设计是由设计者提供几个不同的设计方案，从中比较，挑选出最优化的方案。这种方法往往建立在设计者经验的基础上，再加上资源时间的限制，提供的可选方案数量有限，往往不一定是最优方案。

如果想获得最佳方案，就要提供更多的设计方案进行比较，这就需要大量的资源，单靠人力往往难以做到。只能靠计算机来完成这些，目前为止，能够做结构优化的软件并不多，ANSYS 软件作为通用的有限元分析工具，除了拥有强大的前后处理器外，还有很强大的优化设计功能——既可以做结构尺寸优化也可以做拓扑优化，其本身提供的算法能满足工程需要。

19.1.2 Workbench 结构优化分析

ANSYS Workbench 平台优化分析工具有以下 5 种：

- Direct Optimization（Beta）（直接优化工具）：设置优化目标，利用默认参数进行优化分析，从中得到期望的组合方案。
- Goal Driven Optimization（多目标驱动优化分析工具）：从给定的一组样本中得到最佳的设计点。
- Parameters Correlation（参数相关性优化分析工具）：可以得出某一输入参数对应响应曲面的影响的大小。
- Response Surface（响应曲面优化分析工具）：通过图表来动态显示输入与输出参数之间的关系。
- Six Sigma Analysis（六西格玛优化分析工具）：基于 6 个标准误差理论来评估产品的可靠性概率，判断产品是否满足六西格玛准则。

19.2 优化分析实例——响应曲面优化分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 16.0 的响应曲面优化分析模块，在 Design Exploration 中进行 DOE 分析的流程，并建立相应图。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 响应曲面优化分析的方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter19\char19-1\DOE2.agdb
结果文件	网盘\Chapter19\char19-1\DOE2.wbpj

19.2.1 问题描述

如图 19-1 所示的几何模型，请用 ANSYS Workbench 平台中的优化分析工具对几何模型进行优化分析。

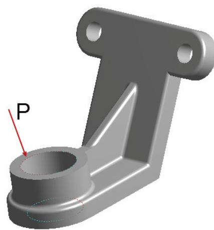


图 19-1　几何模型

19.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→Workbench 16.0 命令，启动 ANSYS Workbench 16.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）选项，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 19-2 所示。

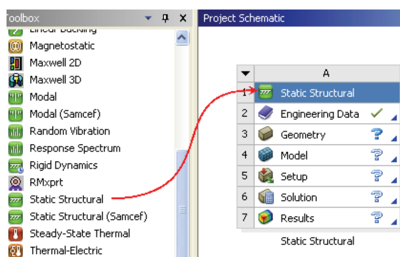


图 19-2 创建分析项目 A

19.2.3 导入几何模型

Step1：在 A2 Geometry 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 19-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：选择文件路径，如图 19-4 所示，选择文件 DOE2.agdb，并单击“打开”按钮。

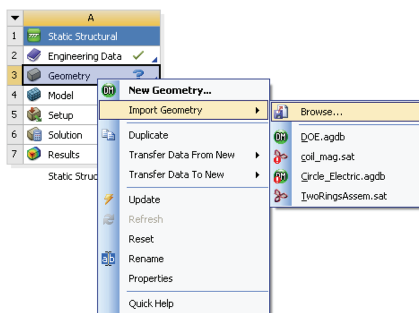


图 19-3 导入几何体

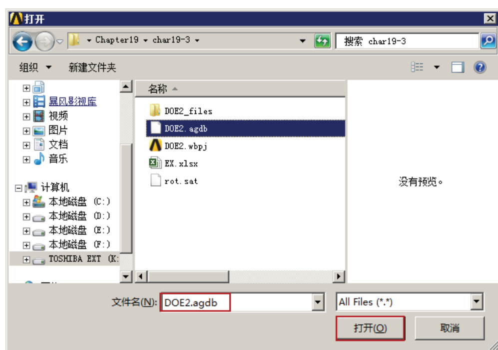


图 19-4 选择文件

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry），此时会加载 DesignModeler，如图 19-5 所示，在模型中有个参数被设置为参数化。

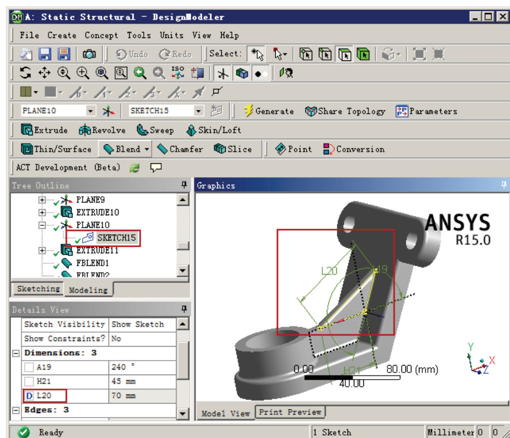


图 19-5 加载几何模型

Step4： 单击 DesignModeler 界面右上角的☒（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面，此时项目流程图表如图 19-6 所示，下面出现的 Parameter Set 可以进行参数化设置。

Step5： 双击 A4（Model）进入图 19-7 所示的有限元分析平台，设置边界条件如下。

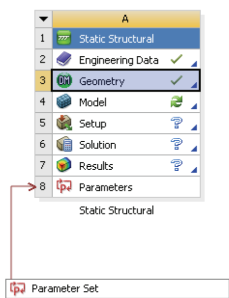


图 19-6 项目流程图表

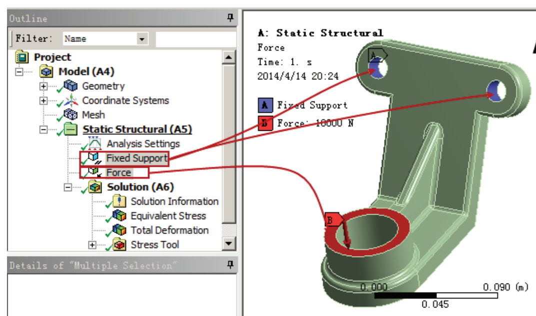


图 19-7 添加条件

选择 Support→Fixed Support 并选择右侧的两个圆孔。

选择 Load→Force 并选择左侧的圆面，载荷大小为 10000N。

在 Solution 中添加 Equivalent Stress 及 Total Deformation 两个选项，并分别设置最大应力及最大总应变为参数化，如图 19-8 所示。

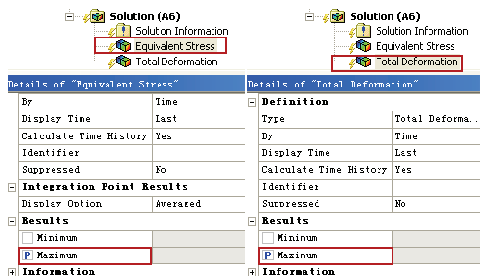


图 19-8 添加选项

Step6： 选择最小安全系数进行后处理，并将最小安全系数及质量设置为参数，如图 19-9 和图 19-10 所示。

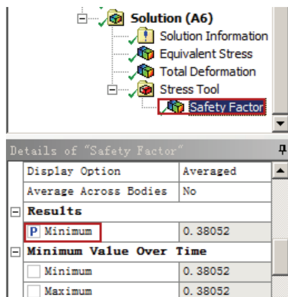


图 19-9 参数化设置 1

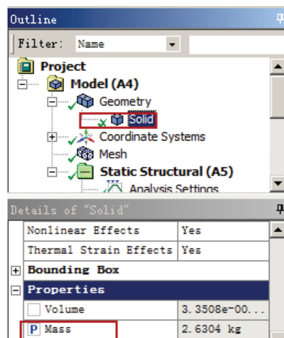


图 19-10 参数化设置 2

Step7： 计算完成后的应力云图及变形云图如图 19-11 和图 19-12 所示。

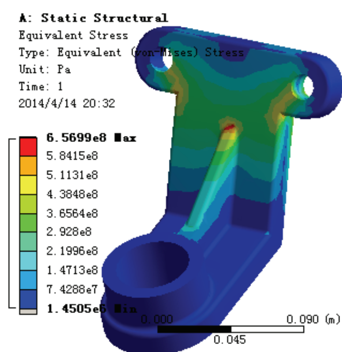


图 19-11　应力云图

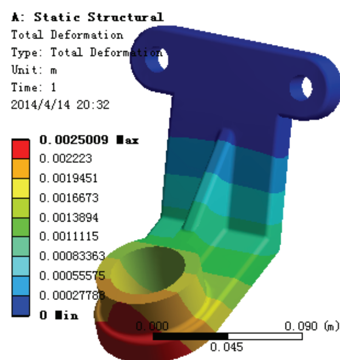


图 19-12　变形云图

Step8： 其安全系数如图 19-13 所示。

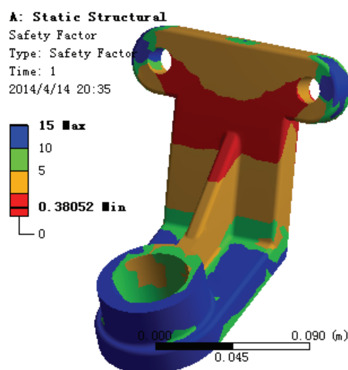


图 19-13　安全系数分布云图

Step9： 双击 Workbench 平台中的 Parameter Set 选项，此时弹出图 19-14 所示的输入输出列表框。

	A
1	Static Structural
2	Engineering Data
3	Geometry
4	Model
5	Setup
6	Solution
7	Results
8	Parameters

Static Structural

Parameter Set

	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (A1)			
4	P1	ds_web	70	
5	P3	Force Y Component	-10000	N
*	New input parameter	New name	New expression	
7	Output Parameters			
8	Static Structural (A1)			
9	P2	Solid Mass	2.6304	kg
10	P4	Equivalent Stress Maximum	656.99	MPa
11	P5	Total Deformation Maximum	2.5009	mm
12	P6	Safety Factor Minimum	0.38052	
*	New output parameter		New expression	
14	Charts			

图 19-14　输入输出列表框

Step10：返回到 Workbench 平台。

Step11：双击 Design Exploration→Response Surface Optimization 选项，如图 19-15 所示。

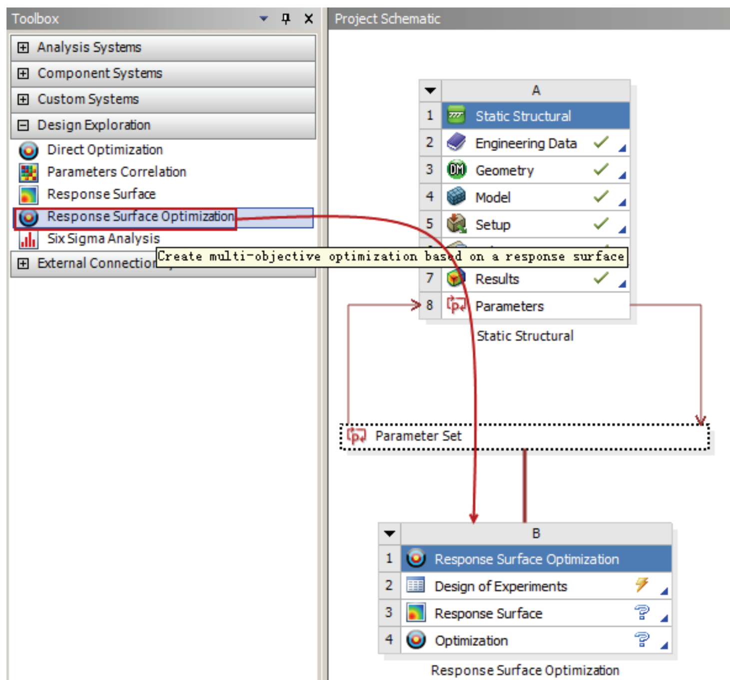


图 19-15　添加响应面

Step12：双击项目 B 中的 B2（Design of Experiments），进入参数列表（见图 19-16）确定输入输出。

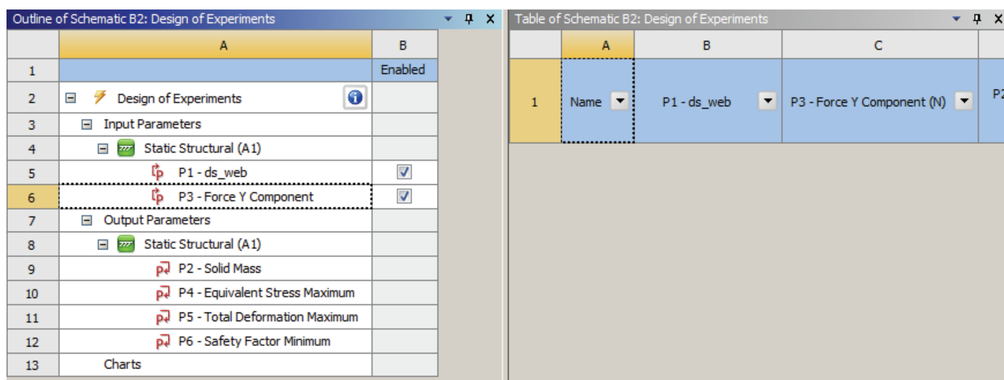


图 19-16　确定输入输出

Step13：单击 P1-ds_web 栏，在下面出现的窗口中的 Lower Bound 栏中输入 60，在 Upper Bound 栏中输入 80。

单击 P3-Force Y Component 栏，在下面出现的窗口中的 Lower Bound 栏中输入-11000，在 Upper Bound 栏中输入-9000，如图 19-17 所示。

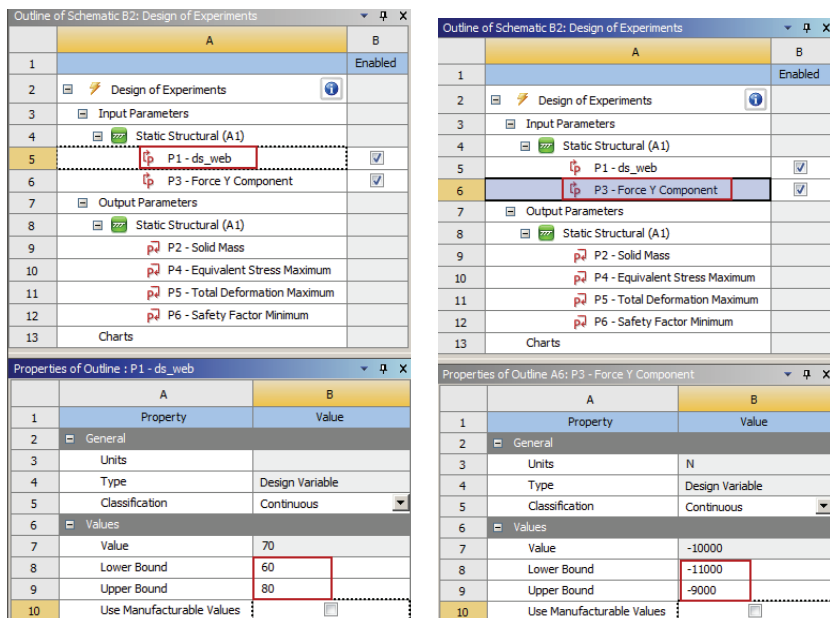


图 19-17　输入限值

Step14： 单击 Workbench 平台上工具栏中的 Preview 命令，生成图 19-18 所示的设计点。

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)	P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Safety Factor Minimum
2	1	70	-10000	⚡	⚡	⚡	⚡
3	2	60	-10000	⚡	⚡	⚡	⚡
4	3	80	-10000	⚡	⚡	⚡	⚡
5	4	70	-11000	⚡	⚡	⚡	⚡
6	5	70	-9000	⚡	⚡	⚡	⚡
7	6	60	-11000	⚡	⚡	⚡	⚡
8	7	80	-11000	⚡	⚡	⚡	⚡
9	8	60	-9000	⚡	⚡	⚡	⚡
10	9	80	-9000	⚡	⚡	⚡	⚡

图 19-18　生成设计点

Step15： 单击工具栏中的 Update 命令，进行计算。计算完成后设计点结果如图 19-19 所示。

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)	P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Safety Factor Minimum
2	1 (DP 0)	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052
3	2	60	-10000	2.6112	663.82	2.7203	0.37661
4	3	80	-10000	2.6483	580.02	2.2729	0.43102
5	4	70	-11000	2.6304	766.99	2.7453	0.32595
6	5	70	-9000	2.6304	627.53	2.2461	0.39838
7	6	60	-11000	2.6112	730.2	2.9923	0.34237
8	7	80	-11000	2.6483	638.02	2.5002	0.39183
9	8	60	-9000	2.6112	597.44	2.4482	0.41845
10	9	80	-9000	2.6483	522.02	2.0456	0.47891

图 19-19　设计点结果

Step16： 选择 Design of Experiments 选项，在下面出现的图 19-20 所示的 Properties of Outline“Design of Experiments”对话框中进行如下设置。

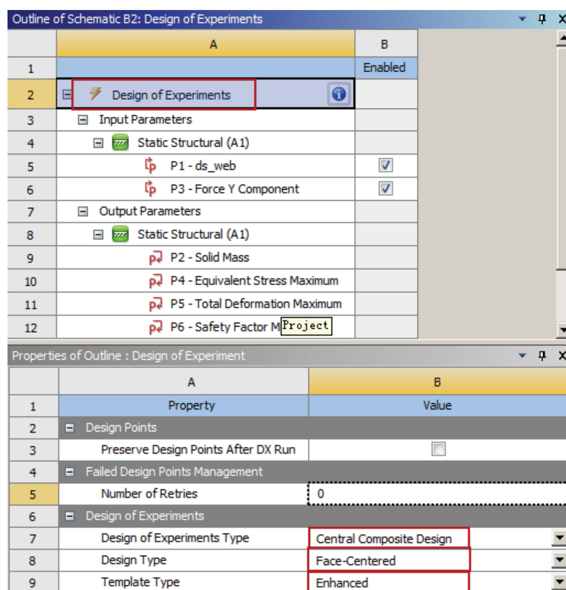


图 19-20　设置选项

在 Design of Experiments Type 栏中选择 Central Composite Design 选项。

在 Design Type 栏中选择 Face-Centered 选项。

在 Template Type 栏中选择 Enhanced 选项。

Step17： 单击工具栏中的 Preview 命令生成设计点，如图 19-21 所示。

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Face-Centered : Enhanced)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)	P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Safety Factor Minimum
2	1 (DP 0)	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052
3	2	60	-10000	2.6112	663.82	2.7203	0.37661
4	3	65	-10000	⚡	⚡	⚡	⚡
5	4	80	-10000	2.6483	580.02	2.2729	0.43102
6	5	75	-10000	⚡	⚡	⚡	⚡
7	6	70	-11000	2.6304	766.99	2.7453	0.32595
8	7	70	-10500	⚡	⚡	⚡	⚡
9	8	70	-9000	2.6304	627.53	2.2461	0.39838
10	9	70	-9500	⚡	⚡	⚡	⚡
11	10	60	-11000	2.6112	730.2	2.9923	0.34237
12	11	65	-10500	⚡	⚡	⚡	⚡
13	12	80	-11000	2.6483	638.02	2.5002	0.39183
14	13	75	-10500	⚡	⚡	⚡	⚡
15	14	60	-9000	2.6112	597.44	2.4482	0.41845
16	15	65	-9500	⚡	⚡	⚡	⚡
17	16	80	-9000	2.6483	522.02	2.0456	0.47891
18	17	75	-9500	⚡	⚡	⚡	⚡

图 19-21　生成设计点

Step18： 单击工具栏中的 Update 命令，进行计算。计算完成后设计点结果如图 19-22 所示。

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Face-Centered : Enhanced)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)	P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)	P6 - Safety Factor Minimum
2	1 (DP 0)	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052
3	2	60	-10000	2.6112	663.82	2.7203	0.37661
4	3	65	-10000	2.621	694.13	2.61	0.36016
5	4	80	-10000	2.6483	580.02	2.2729	0.43102
6	5	75	-10000	2.6395	681.64	2.3832	0.36676
7	6	70	-11000	2.6304	766.99	2.7453	0.32595
8	7	70	-10500	2.6304	732.04	2.62	0.34151
9	8	70	-9000	2.6304	627.53	2.2461	0.39838
10	9	70	-9500	2.6304	662.32	2.3705	0.37746
11	10	60	-11000	2.6112	730.2	2.9923	0.34237
12	11	65	-10500	2.621	728.84	2.7405	0.34301
13	12	80	-11000	2.6483	638.02	2.5002	0.39183
14	13	75	-10500	2.6395	715.72	2.5024	0.3493
15	14	60	-9000	2.6112	597.44	2.4482	0.41845
16	15	65	-9500	2.621	659.43	2.4795	0.37912
17	16	80	-9000	2.6483	522.02	2.0456	0.47891
18	17	75	-9500	2.6395	647.56	2.264	0.38606

图 19-22　设计点结果

19.2.4 结果后处理

Step1：右键选择项目 B 的 B2 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令，此时进入设计点处理界面。

Step2：在 Outline of Schematic B3：Surface 栏中选择 Response 栏。

在下面出现的 Properties of Outline：Response 栏中进行如下操作。

在 X Axis 栏中选择 P3-Force Y Component 选项。

在 YAxis 栏中选择 P5-Total Deformation 选项。

此时右下角对话框中显示出前面载荷和变形的关系曲线，如图 19-23 所示。

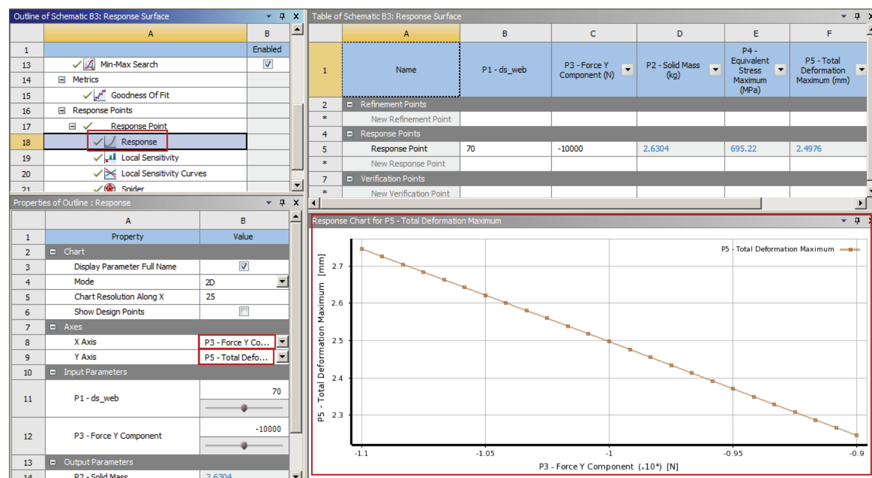


图 19-23　载荷与变形关系曲线

Step3：选择 Response 选项，在下面的对话框中进行如下操作。

在 Mode 栏中选择 3D。

在 X Axis 栏中选择 P3-Force Y Component 选项。

在 YAxis 栏中选择 P1-ds_web 选项。



在 Z Axis 栏中选择 P5-Total Deformation 选项。

此时将显示图 19-24 右侧所示三维曲面关系曲面。

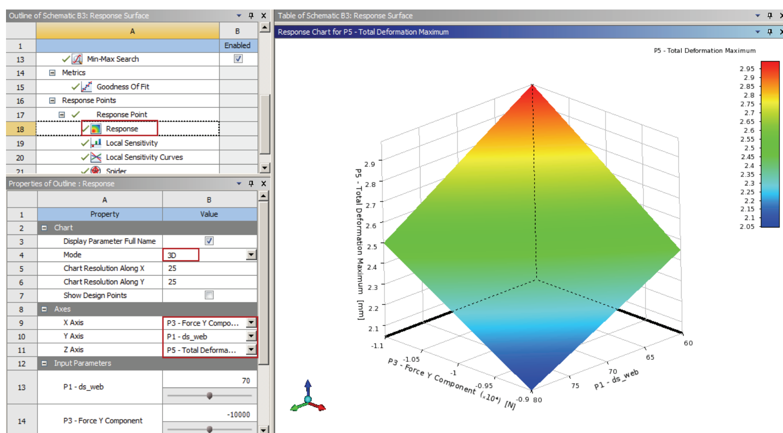


图 19-24　三维曲面关系曲面

Step4： 单击 Goodness of Fit 选项，其余保持默认，此时将显示图 19-25 右侧所示的拟合曲线与离散数据点。

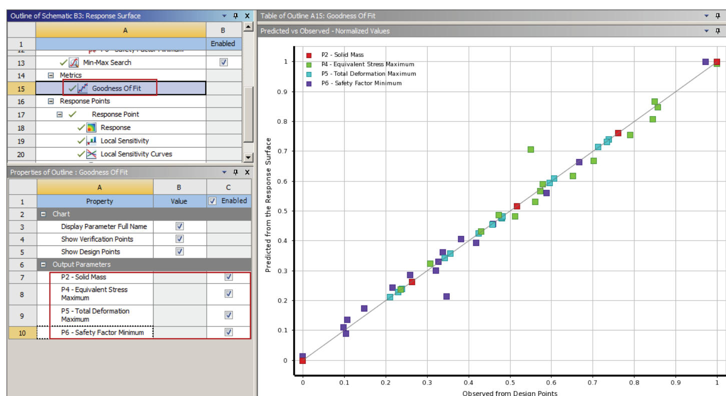


图 19-25　Goodness of Fit 图表

Step5： 选择 Response Surface 选项，然后在 Properties of Schematic B3：Response Surface 表中进行如下设置。

在 Response SurfaceType 栏中选择 Kriging 选项，单击工具栏中的 Update 命令，如图 19-26 所示。

Step6： 选择 Response 选项，在下面的对话框中进行如下操作。

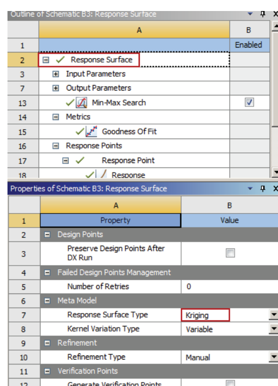
在 Mode 栏中选择 3D。

在 X Axis 栏中选择 P3-Force Y Component 选项。

在 YAxis 栏中选择 P1-ds_web 选项。

在 Z Axis 栏中选择 P5-Total Deformation 选项。

此时将显示图 19-27 右侧所示三维曲面关系曲面。



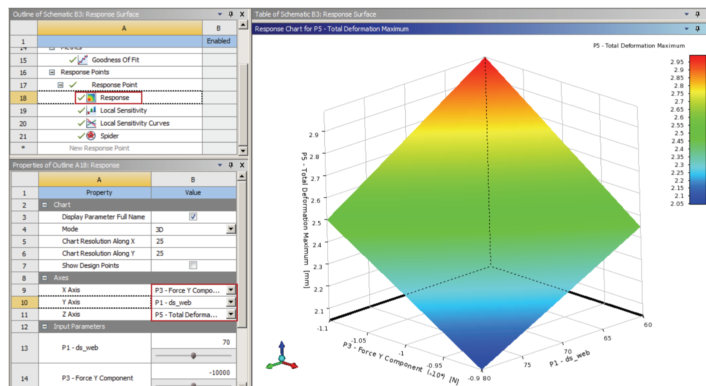


图 19-26 设置　　　图 19-27 三维曲面关系曲面

Step7：单击 Local Sensitivity 选项，显示图 19-28 所示的柱状图图表。

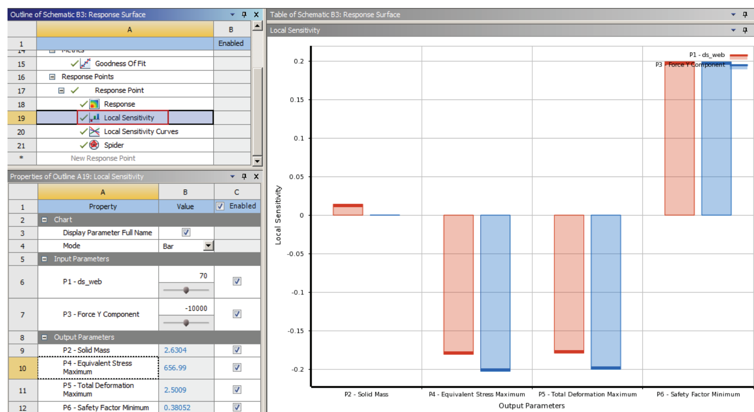


图 19-28 柱状图图表

Step8：返回到项目管理窗口，双击 B4 栏，在出现的图 19-29 所示的对话框中进行如下设置。

选择 Optimization 选项。

在 Properties of Outline A2：Method 窗口中进行如下设置。

在 Method Name 栏中选择 Screening 选项。

在 Number of Samples 栏中输入 1000。

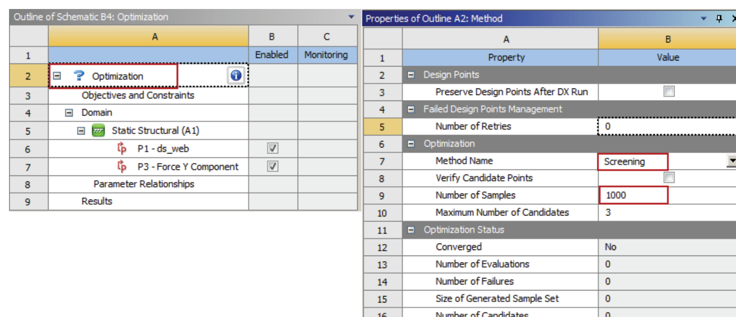


图 19-29 设置参数

Step9： 单击 Objectives and Constraints 选项，在右侧出现的图 19-30 所示的窗口中进行如下设置。

在 Parameter 栏中选择 P2-Solid Mass 选项，在 Type 栏中选择 Minimize 选项。

插入一行，在 Parameter 栏中选择 P5-Total Deformation Maximum 选项，在 Type 栏中选择 Minimize 选项。

此时在 Objectives and Constraints 选项下面将出现 Minimize P2 和 Minimize P5 两个选项。

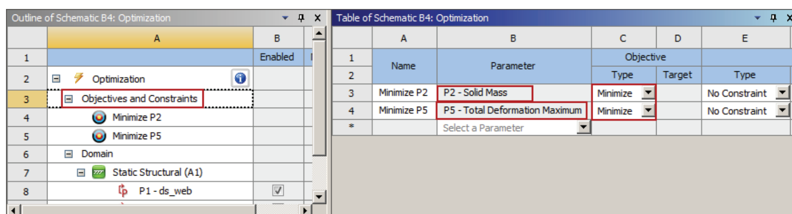


图 19-30　设置添加选项

Step10： 单击工具栏中的 Update 选项，计算完成后的结果如图 19-31 所示。

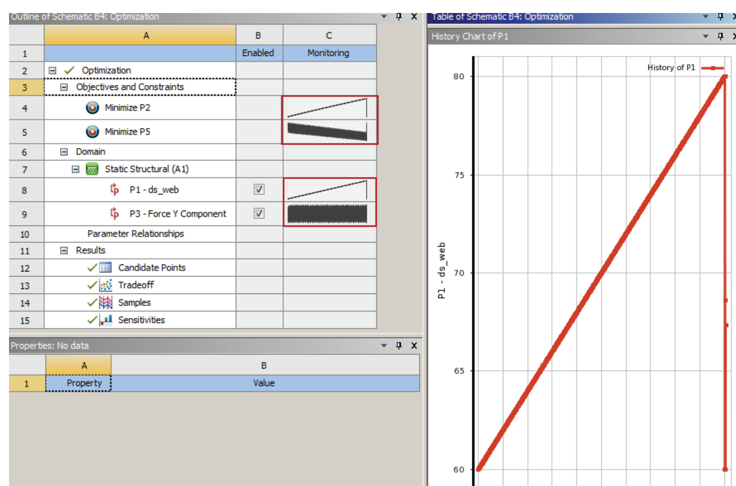


图 19-31　图表

Step11： 单击 Candidate Points 选项，此时右侧将出现图 19-32 所示的基于目标优化的最优设计的 3 个候选方案。

Outline of Schematic B4: Optimization

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
8	P1 - ds_web	☑	
9	P3 - Force Y Component	☑	
10	Parameter Relationships		
11	Results		
12	Candidate Points		
13	Tradeoff		
14	Samples		
15	Sensitivities		

Table of Schematic B4: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)		P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)		P6 - Safety Factor Mini...
2					Parameter Value	Variation from Reference		Parameter Value	Variation from Reference	
3	◉	Candidate Point 1	60.63	-9061.5	2.6124	0.00%	607.38	2.4523	0.00%	0.41204
4	○	Candidate Point 2	60.55	-9311.5	2.6123	-0.01%	620.52	2.5222	2.85%	0.40212
5	○	Candidate Point 3	60.59	-9561.5	2.6124	0.00%	636.73	2.5893	5.59%	0.39161
*		New Custom Candidate Point	70	-10000						

图 19-32　候选方案

Step12： 单击 Tradeoff 选项，此时将出现图 19-33 所示的质量与应力关系图。

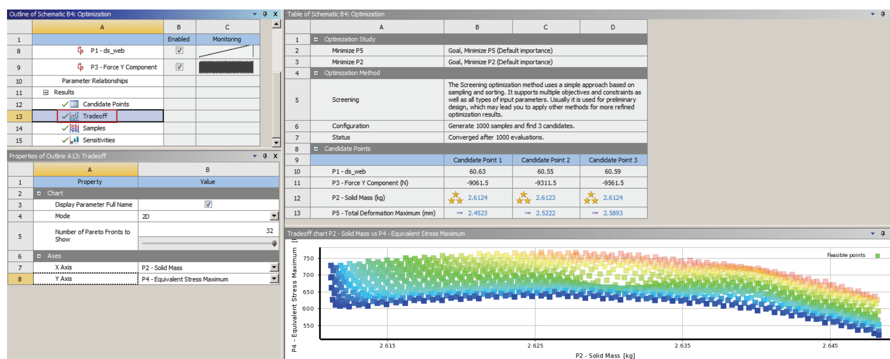


图 19-33 质量与应力关系图

Step13： 单击 Tradeoff 选项，此时将出现图 19-34 所示的质量与应力关系曲线，从本图和上面的点状关系图可以看出，增加质量就会降低应力分布。

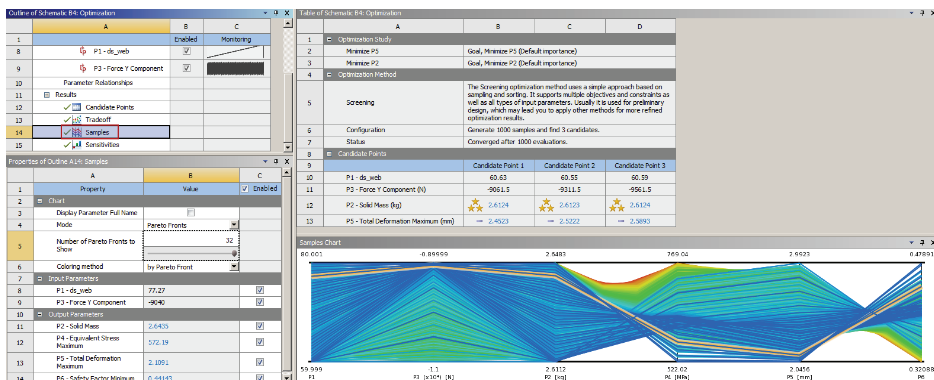


图 19-34 质量与应力关系曲线

Step14： 如图 19-35 所示，右键单击 Candidate Point 2 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Verify by Design Point Update 选项。

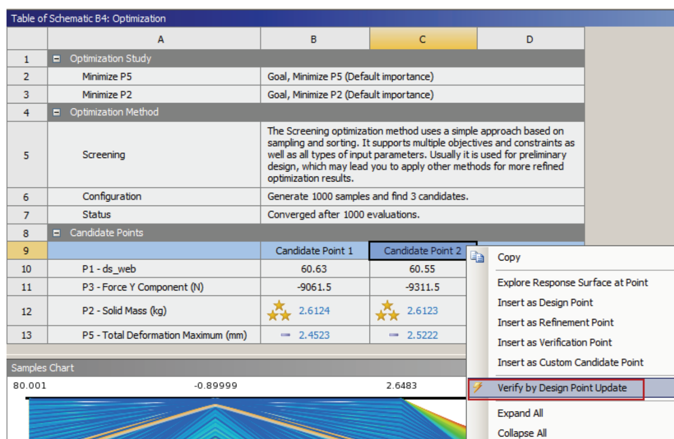
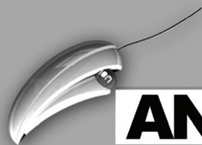


图 19-35 快捷菜单



Step15： 如图 19–36 所示，此时能看到获选方案 2 在总体优化方案中的位置。

Outline of Schematic B4: Optimization

	A	B
1		Enabl
9	P3 - Force Y Component	☑
10	Parameter Relationships	
11	Results	
12	Candidate Points	
13	Tradeoff	
14	Samples	
15	Sensitivities	

Properties of Outline A12: Candidates

Table of Schematic B4: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Reference	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)	P2 - Solid Mass (kg)		P4 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	P5 - Total Deformation Maximum (mm)		P6 - Safety Factor Mini...
2					Parameter Value	Variation from Reference		Parameter Value	Variation from Reference	
3	◉	Candidate Point 1	60.63	-9061.5	2.6124	0.00%	607.38	2.4523	0.00%	0.41204
4	○	Candidate Point 2	60.55	-9311.5	2.6123	-0.01%	620.52	2.5222	2.85%	0.40212
5	○	Candidate Point 2 (verified)			2.6123	-0.01%	663.57	2.5202	2.77%	0.37675
6	○	Candidate Point 3	60.59	-9561.5	2.6124	0.00%	636.73	2.5893	5.59%	0.39161
*		New Custom Candidate Point	70	-10000						

图 19–36　得到获选方案

Step16： 如图 19–37 所示，右键选择 Candidate Point 2 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert as Design Point 选项，返回到 Workbench 平台中，双击 Parameter Set 选项，进入图 19–38 所示的窗口中。

Table of Schematic B4: Optimization , Candidate Points

	A	B	C	D
1	Reference	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component (N)
2				
3	◉	Candidate Point 1	60.63	-9061.5
4	○	Candidate Point 2		
5	○	Candidate Point 2 (verified)		
6	○	Candidate Point 3		
*		New Custom Candidate Point		

Copy
Explore Response Surface at Point
Insert as Design Point
Insert as Refinement Point
Insert as Verification Point
Insert as Custom Candidate Point
Export Data

图 19–37　快捷菜单

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component	P2 - Solid Mass	P4 - Equivalent Stress Maximum	P5 - Total Deformation Maximum	P6 - Safety Factor Minimum
2	Units		N	kg	MPa	mm	
3	Current	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052
4	DP 1	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052
5	DP 2	60.55	-9311.5				
*							

图 19–38　创建设计点

Step17： 如图 19–39 所示，右键选择 DP2 栏，在弹出的快捷菜单中选择 Copy inputs to Current 选项，此时创建了一个新 Current 选项，右键选择新 Current 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Update Selected Design Points 选项，进行计算。

Table of Design Points

	A	B	C	
1	Name	P1 - ds_web	P3 - Force Y Component	P2 - Ma
2	Units		N	
3	Current	70	-10000	2.63
4	DP 1	70	-10000	2.63
5	DP 2			
*				

Copy
Show Update Order
Set Update Order by Row
Optimize Update Order
Delete Design Point
Duplicate Design Point
Copy inputs to Current

Chart: No data

Table of Design Points

	A	B	C	
1	Name	P1 - d...	P3 - Force...	P2 - Sc Mass
2	Units		N	kg
3	Current			
4	DP 1			
5	DP 2			
*				

Copy
Show Update Order
Set Update Order by Row
Optimize Update Order
Duplicate Design Point
Update Selected Design Points
Expand All

图 19–39　选择快捷命令进行计算

Step18： 计算完成后的 Current 选项结果如图 19–40 所示。

Table of Design Points

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Name	P1 - d...	P3 - Force...	P2 - S...	P4 - Equivalen...	P5 - Total Deform...	P6 - Safe...	Exported
2	Units		N	kg	MPa	mm		
3	Current	60.55	-9311.5	2.6304	592.76	2.3283	0.42176	
4	DP 1	70	-10000	2.6304	656.99	2.5009	0.38052	
5	DP 2	60.55	-9311.5					
*								

图 19-40　当前设计点结果

Step19： 返回到 Workbench 平台中，双击项目 B 中的 B7（Results）栏，进入 Mechanical 界面，单击 Total Deformation 和 Equivalent Stress 命令，云图如图 19-41 所示。

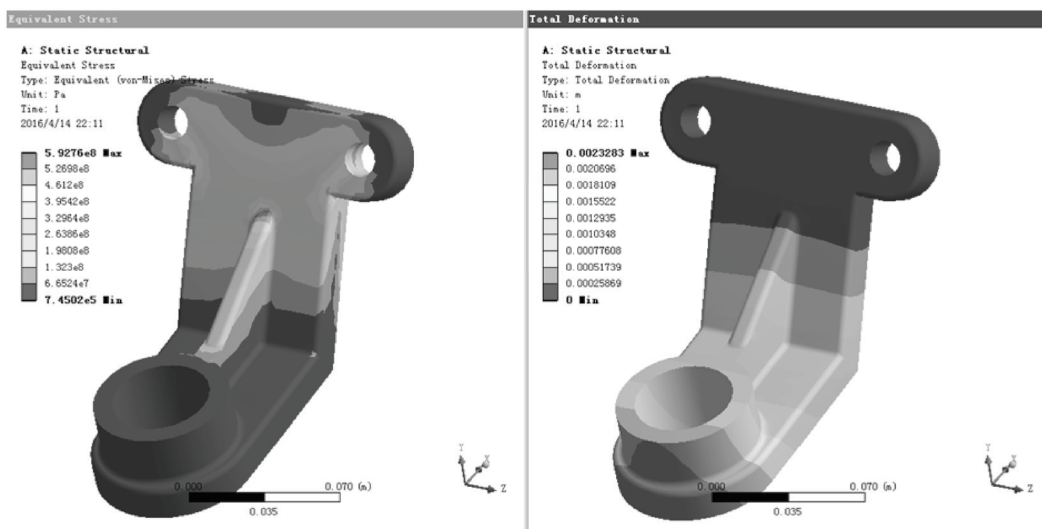


图 19-41　云图

Step20： 选择安全系数计算命令，显示安全系数云图（见图 19-42）。

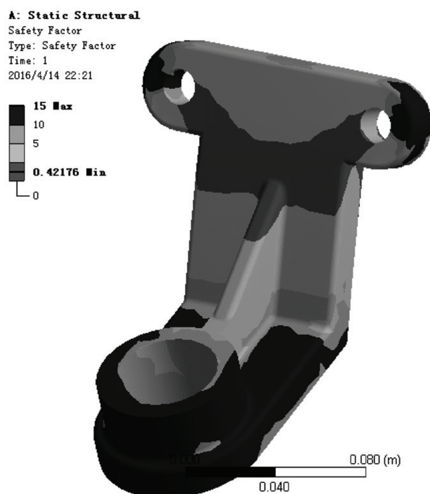


图 19-42　云图

Step21：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

Step22：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 DOE2.wbpj。

Step23：单击右上角的（关闭）按钮，完成项目分析。

19.3　本章小结

本章详细地介绍了 ANSYS Workbench 16.0 软件内置的优化分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定和后处理等操作，同时还讲解了响应曲面优化设置及处理方法。

通过本章的学习，读者应该对优化分析的过程有详细的了解。

第 6 篇

第 20 章　ANSYS AIM 分析过程

本章将对 ANSYS AIM 分析环境的静力学分析功能进行实例讲解，介绍其几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定和后处理操作等。

学习目标 知识点	了　解	理　解	应　用	实　践
AIM 分析环境应用	√			
AIM 分析环境的意义		√	√	√
AIM 分析环境静力分析的一般过程			√	√

20.1　ANSYS AIM 分析环境简介

ANSYS AIM 是 ANSYS Workbench 16.0 版新增加的具有统一环境的有限元分析平台，AIM 是一种集成式 3D 工程仿真解决方案，可在现代化的单一用户环境中整合多个物理场。AIM 的仿真价值超越了单物理场应用，能够在直观的沉浸式用户环境中提供全系列的物理仿真，而且随时可在多个工程部门中部署。

AIM 在单个集成环境内提供几何导入、前处理、网格剖分、求解以及后处理功能，这样能提高单物理场和多物理场仿真的生产效率并减少部署成本。

AIM 初始版本包含由 IronPython（Python 编程语言的一种开源实现方案）实现的本地日志与脚本功能。用户可利用本地日志与脚本来记录、定制和重演所有仿真步骤。AIM 的这项功能对于负责仿真部署和管理的 CAE 方法团队来说尤其具有吸引力。

借助脚本功能，客户可通过创建定制模板来实现工程最佳实践的自动化，为设计工程师提供仿真驱动产品开发功能。AIM 还能针对所有输入模型使用强大的表达式语言，从而进一步实现定制化，通过表达式定义复杂的边界条件。

AIM 用户界面也可通过用户自定义扩展来进一步实现定制化。AIM 的主要区别在于相同的定制工具、表达式语言和脚本语法可用在 SDPD 的各个方面，这样能实现协作并提高生产效率。

AIM 仿真技术的各个方面旨在充分利用当今并行计算架构优势。网格生成和求解可以利用多个 CPU 内核，AIM 中的所有物理求解器都默认使用两个并行内核（与现在的 MAPDL 求解器工作方式类似）。AIM 还包含由 GPU 和 CPU 进行加速的流体和结构后处理。

AIM 初始版本可支持最常用的基本物理功能，实现稳态流体流动、静态和模态结构分析、稳态热学和直流电导仿真。此外，AIM 还支持多物理场耦合，包括单向流固耦合、热–

应力、热-电以及热-电-应力耦合。AIM 为设计工程师提供了一种可行的单物理场和多物理场仿真产品。

AIM 许可证允许访问 DesignXplorer，以执行关联、试验设计、优化和稳健设计仿真。AIM 中的模型输入和输出值可实现参数化，并包含在设计点或优化研究中。AIM 能从 AIM 窗口内方便地在保留的设计点之间切换，以快速方便地进行对比研究。

20.2 ANSYS AIM 分析实例——板件弯曲分析

本节主要介绍在 ANSYS AIM 的静力分析环境，建立（导入外部几何模型）进行静态力学分析的一般操作过程。

学习目标：熟练掌握 ANSYS AIM 的静力分析环境中有限元分析方法及过程。

模型文件	网盘\Chapter20\char20-1\plate.stp
结果文件	网盘\Chapter20\char20-1\ANSYS AIM Problem.wbpj

20.2.1 问题描述

本案例将在 ANSYS AIM 分析环境中对一个一端固定的板件，另一端施加 500N 的外力时进行有限元分析。

20.2.2 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下执行“开始”→“所有程序”→ANSYS 16.0→ANSYS AIM 16.0 命令，进入 AIM 分析环境，如图 20-1 所示。

Step2：此时启动 ANSYS AIM 分析环境，如图 20-2 所示，由于 ANSYS AIM 分析环境是基于 ANSYS Workbench 分析平台开发的统一分析环境，故在分析环境中显示的是 Workbench 字样，AIM 分析环境主要包括以下几部分。

- Study：位于分析环境的左侧，在 Study 区域中显示了当前可以进行的分析类型及几何创建与导入模块；当前版本的 AIM 能进行的分析有结构分析（静态与模态）、流体动力学分析、热学分析（暂态与瞬态）、结构热耦合分析和结构热电耦合分析等。
- Workflow&Messsage：位于 AIM 分析环境的下方，主要为显示一个有限元分析的分析流程，包括几何导入、网格划分、求解计算与后处理四个过程。
- AIM 向导：位于 AIM 分析环境的右侧，由于 AIM 是全新的分析环境，与传统的 Workbench 平台的分析过程有所不同，所以对于初学者来说在使用上起到了一个提示与实时学习的作用。
- AIM 几何图形显示区：以上 3 个部分均浮动在 AIM 几何图形显示区上面，用户可以根据自己的喜好，单击上面的«、︾或»图标来对各个部分进行隐藏。

注：ANSYS AIM 已经完全集成到了 ANSYS SpaceClaim 几何建模平台中，在 ANSYS SpaceClaim 中建立完几何并保存文件后，依次选择准备选项卡中的 AIM 16.0 按钮，即可启动 ANSYS AIM 分析环境，如图 20-3 所示。

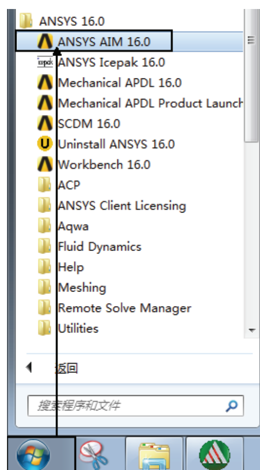


图 20-1　AIM 启动

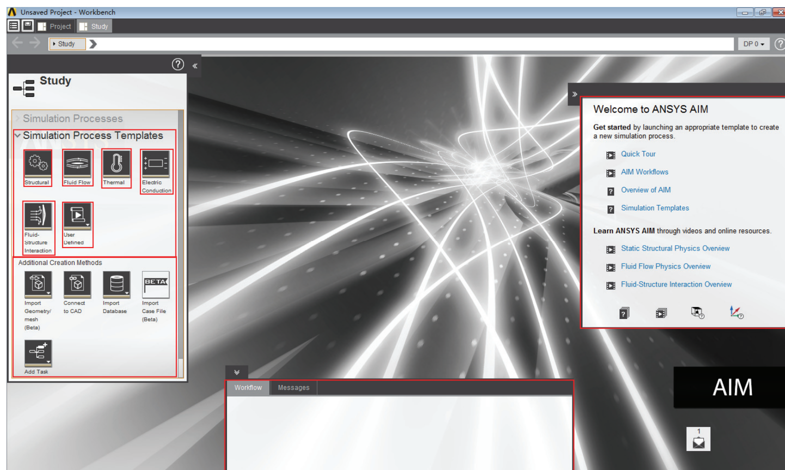


图 20-2　AIM 分析环境



图 20-3　AIM 在 ANSYS SpaceClaim 中启动

Step3： 在 ANSYS AIM 分析环境左侧出现图 20-4 所示 Study 部分，目前所有分析模板均列在 Study 部分中，单击 Structural 按钮。

Step4： 弹出图 20-5 所示 Structural Template，在 Physics 中选择 Structural Only，在 Calculation type 中选择 Static，并单击 Create Simulation Process 按钮。



图 20-4　Study 组成



图 20-5　AIM 分析模块

Step5： 此时弹出图 20-6 所示几何文件导入窗口，选择 plate.stp 格式文件，并单击“打开”按钮。

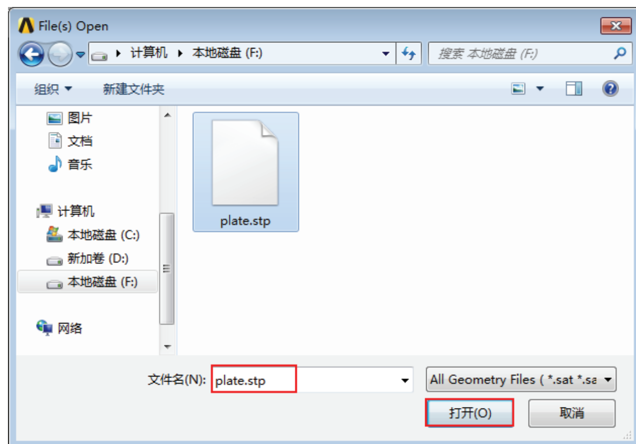


图 20-6　导入几何

Step6：此时在 ANSYS AIM 分析环境中显示出几何模型，如图 20-7 所示，同时在左侧的操作任务栏中显示出分析流程，在底部的 Workflow 中也将显示出分析流程，其中，显示☑的为已经完成的操作，显示❗为未完成的操作。

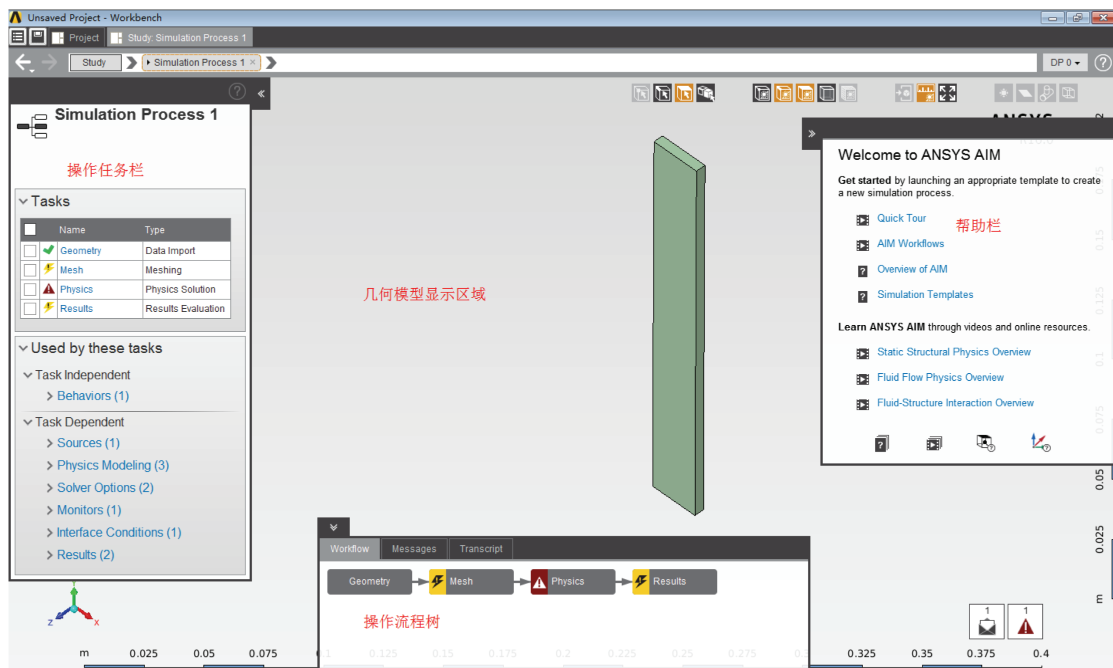


图 20-7　AIM 图形区域

Step7：单击左侧工作任务栏中 Tasks→Mesh 命令，如图 20-8 所示。

Step8：此时将弹出图 20-9 所示 Mesh 设置窗口，在 Mesh 设置窗口中可以进行网格大小与网格类型设置，本例子保持默认，并单击⚡按钮进行网格划分。

注：为划分网格时，下面将提示有 Mesh has not been generated.字样。

Tasks

	Name	Type
✓	Geometry	Data Import
⚡	Mesh	Meshing
▲	Physics	Physics Solution
⚡	Results	Results Evaluation

图 20-8　Tasks 窗口

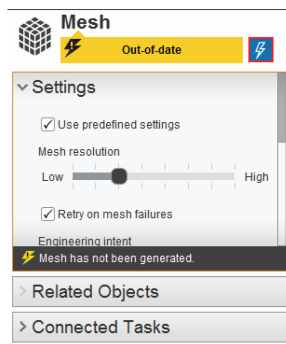


图 20-9　Mesh 窗口

Step9：划分完网格后的几何如图 20-10 所示，同时左侧 Mesh 窗口中将显示出 Up-to-date 字样。

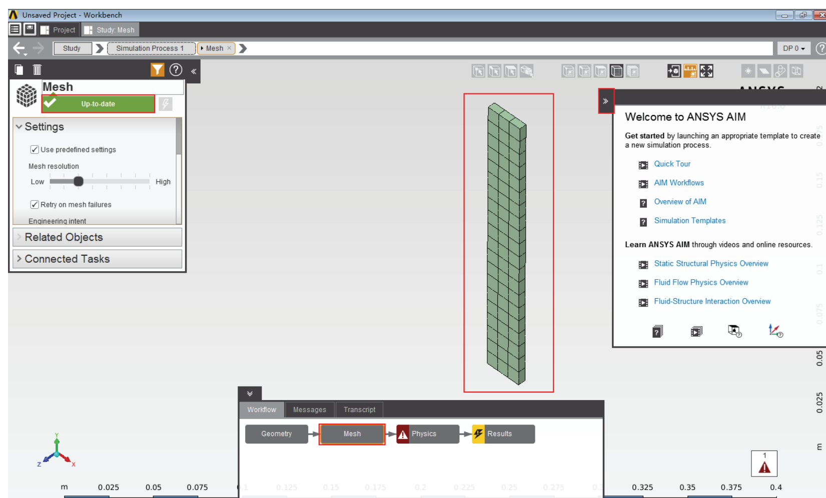


图 20-10　网格显示

Step10：单击 Mesh 窗口上面的“←”，如图 20-11 左图所示，此时先返回到 Simulation Process 窗口，如图 20-11 右图所示。

Unsaved Project - Workbench | Project | Study: Mesh | Study | Simulation Process 1

Mesh — Up-to-date

Settings: Use predefined settings; Mesh resolution Low – High; Retry on mesh failures; Engineering intent

Related Objects

Connected Tasks

Simulation Process 1

Tasks

	Name	Type
✓	Geometry	Data Import
✓	Mesh	Meshing
▲	Physics	Physics Solution
⚡	Results	Results Evaluation

图 20-11　返回操作

Step11：单击 Tasks→Physics 进入到图 20-12 所示设置窗口，在窗口中选择分析类型为 Steady/Static 类型，并单击 Objects 下面的 Physics Region，选中几何实体，然后单击按钮，此时将在 Location 栏中显示出 1 volume 字样。

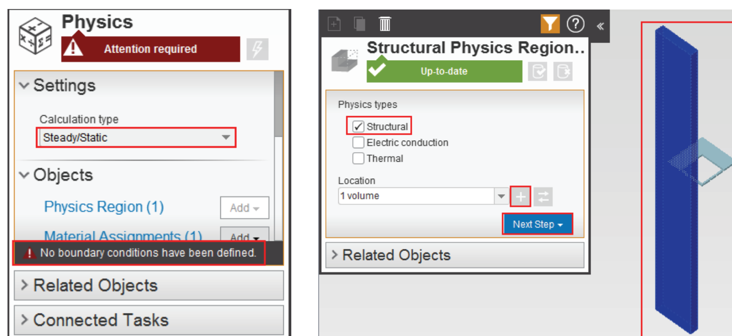


图 20-12　设置窗口

Step12：单击 Next Step 按钮并依次选择 Add→Boundary Conditions→Support，选择几何的一个端面作为固定约束，其余设置保持默认即可，如图 20-13 所示。

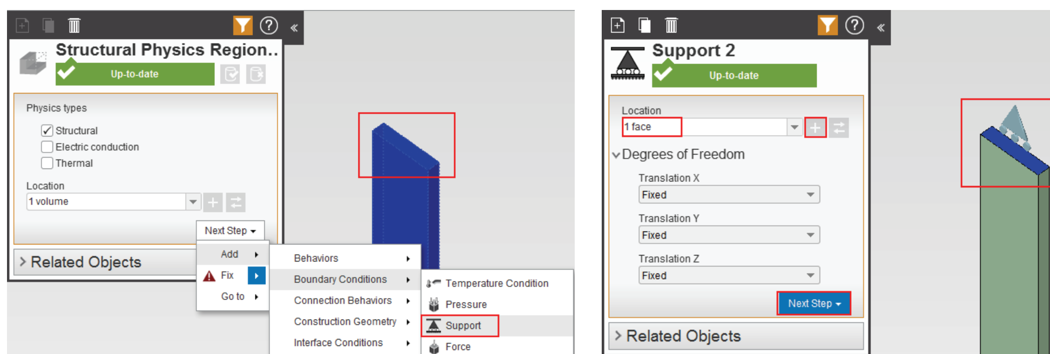


图 20-13　固定设置

Step13：单击 Next Step 按钮并依次选择 Add→Boundary Conditions→Force，选择几何的另一个端面，并在 Z 栏中输入 500N，其余设置保持默认即可，如图 20-14 所示。

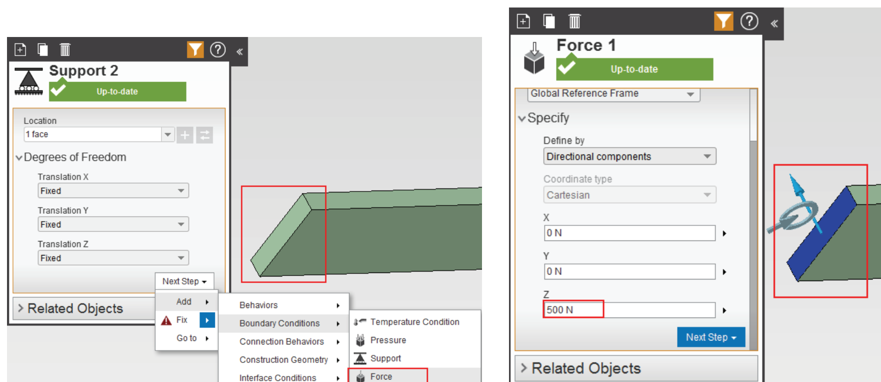


图 20-14　载荷设置

Step14： 返回到 Physics 窗口中，单击 Material Assignments 栏，选择整个几何实体，并选择材料为 Structural Steel，如图 20-15 所示。

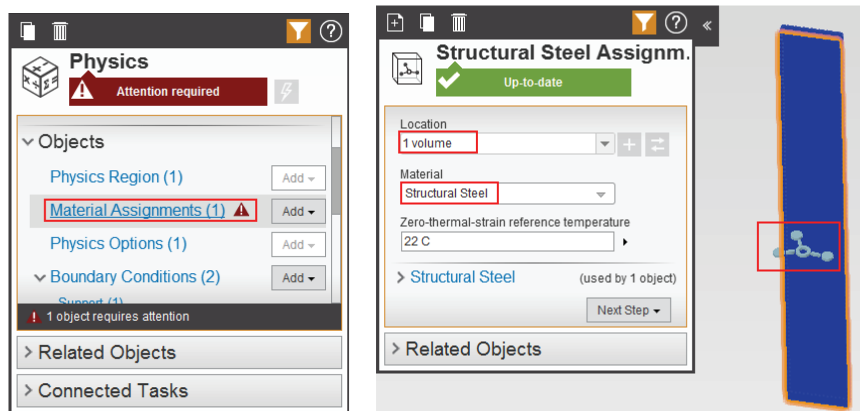


图 20-15　材料设置

Step15： 返回到 Physics 窗口中，单击按钮进行计算，如图 20-16 所示，执行计算的同时，在右下角显示出计算的进度，单击下侧的 Message 选项卡，将显示计算过程的信息。

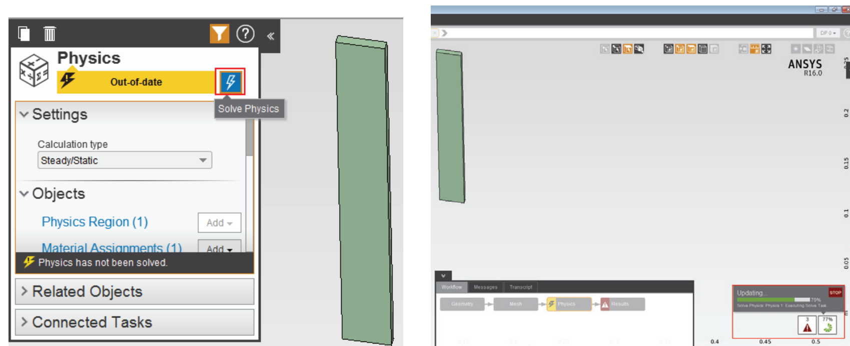


图 20-16　开始计算

Step16： 计算完成后，右键选择下面 Workflow 选项卡中的 Results 命令，在弹出的图 20-17 所示快捷菜单中选择 Update 选项，进行后处理数据更新。

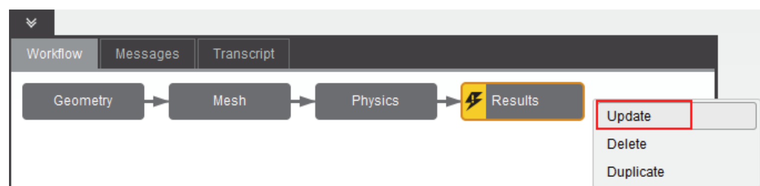


图 20-17　后处理操作

Step17： 单击 Workflow 选项卡中的 Results 命令，在左侧弹出图 20-18 左图所示的 Results 窗口，在窗口中的 Results 后面单击 Add 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Equivalent Stress 命令，此时右侧将显示出等效应力分布云图。



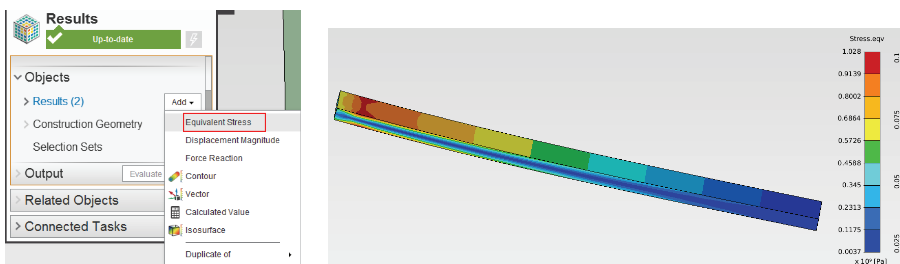


图 20-18　应力分布云图

Step18： 同样操作，选择 DisplacementMagnitude 命令，此时将显示图 20-19 所示的变形云图。

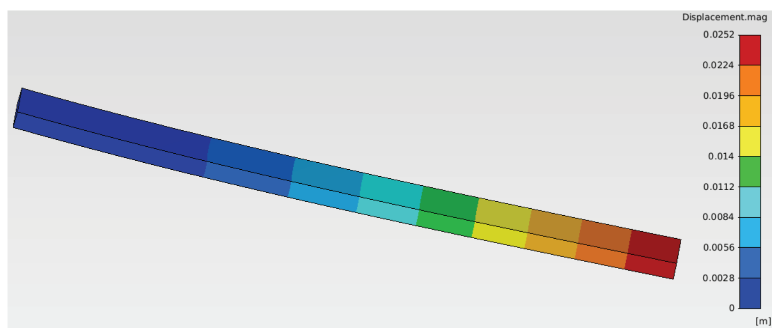


图 20-19　变形云图

Step19： 在上端的导航栏中单击 Results 后面的按钮，在弹出的快捷菜单中依次选择 Associate Actions→Results→Vector 命令，在图 20-20 右侧出现的窗口中的 Variable 中选择 ForceReation 选项，此时将显示图 20-21 所示的反作用矢量图。

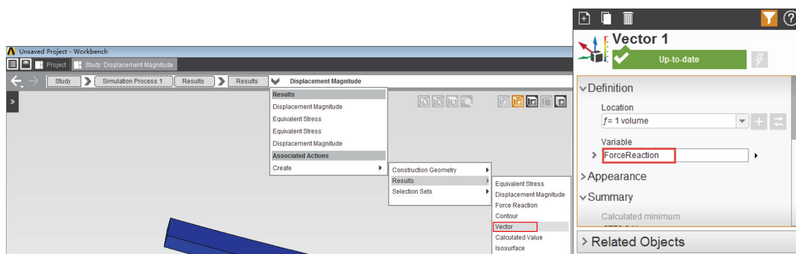


图 20-20　操作

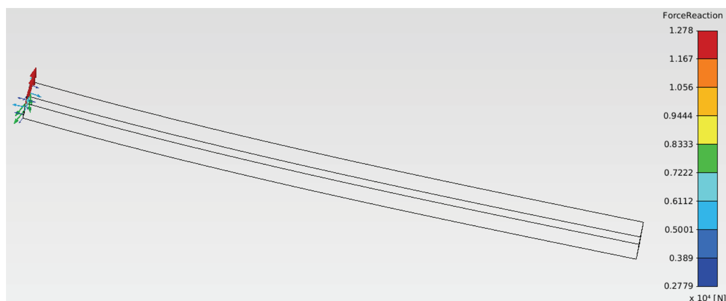


图 20-21　反作用矢量图

Step20：单击工具栏中的 Project 选项卡，此时将切换到熟悉的分析流程图，如图 20-22 右图所示。

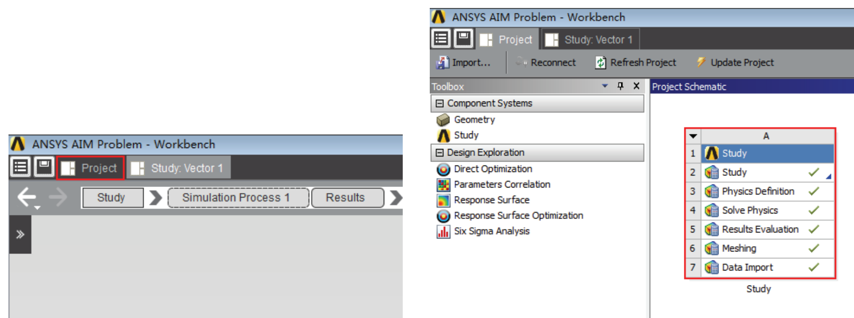


图 20-22　分析流程图

Step21：在 AIM 分析环境中单击（保存）按钮，保存文件名为 ANSYS AIM Problem.wbpj。

Step22：单击右上角的（关闭）按钮，完成项目分析。

20.3　本章小结

本章介绍了 ANSYS AIM 静力分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定和后处理等操作。

通过本章的学习，读者应该对 ANSYS AIM 静力分析的过程有详细的了解。

参 考 文 献

[1] 凌桂龙、丁金滨、温正. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通[M]. 北京：清华大学出版社，2012.
[2] 张岩. ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京：机械工业出版社，2014.
[3] 黄志新，刘成柱. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2013.
[4] Saeed Moaveni. 有限元分析——ANSYS 理论与应用[M]. 2 版. 王崧，等译，北京：电子工业出版社，2005.
[5] 徐鹤山. ANSYS 建筑钢结构工程实例分析[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
[6] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
[7] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.
[8] 张朝晖. ANSYS 8.0 结构分析及实例解析[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
[9] 王矜奉. 压电振动理论与应用[M]. 北京：科学出版社，2011.
[10] 黄国治，傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 2 版. 北京：傅丰礼中国电力出版社，2014.
[11] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 3 版. 南京：南京大学出版社，2012.
[12] 李鹏飞，徐敏义. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京：人民邮电出版社，2011.
[13] 孙纪宁. ANSYS CFX 对流传热数值模拟基础应用教程[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS Workbench 16.0 理论解析与工程应用实例

ANSYS系列已出版

- ANSYS Workbench 16.0理论解析与工程应用实例
- ANSYS 16.1结构分析工程应用实例解析 第4版
- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列


机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-54571-2

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-54571-2
策划编辑◎张淑谦
封面设计◎子时文化

51CTO.com
技术成就梦想


ISBN 978-7-111-54571-2
定价：79.00元